

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อ
สี่เหลี่ยม

A NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER
CHARACTERISTICS IN RECTANGULAR CHANNELS

สรวิศ เอี่ยมสนธิ
วิศรุต ทยานุวัฒน์
อภิภู อัจฉรวารณ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อ
สี่เหลี่ยม

A NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER
CHARACTERISTICS IN RECTANGULAR CHANNELS

สรวิศ	เอี่ยมสนธิ
วิศรุต	ทยานุวัฒน์
อภิญญา	อัจฉราวรรณ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

A NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER
CHARACTERISTICS IN RECTANGULAR CHANNELS

SORAWIT	IAMSONTHI
WISARUT	TAYANUWAT
APHIPHU	ATCHARAWAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม

NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN
RECTANGULAR CHANNELS

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. นาย สรวิศ เอี่ยมสนธิ | รหัสประจำตัว 57011315 |
| 2. นาย วิศรุต ทยานุวัฒน์ | รหัสประจำตัว 57011189 |
| 3. นาย อภิภู อัจฉรวรรณ | รหัสประจำตัว 57011477 |



อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.มจรุส สุขাতะวัฒน์)

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม

นายสรวิศ	เอี่ยมสนธิ	57011315
นายวิศรุต	ทยานุวัฒน์	57011189
นายอภิภู	อัจฉราวรรณ	57011477
ดร.มธุรส	สุชาติวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อสี่เหลี่ยม ซึ่งมีการศึกษาการไหลสถานะเดียวโดยใช้น้ำเป็นสารทำงานและของไหลสองสถานะ อากาศ-น้ำ โดยการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธี volume of fluid (VOF) ซึ่งแบบจำลองในการศึกษาจะพิจารณาให้เป็น 2 มิติ โดยมีทางเข้าเป็นลักษณะท่อตัว T ขนาดความกว้างของท่อมีค่าเท่ากับ 0.617 มิลลิเมตรและท่อมีความยาว 60 มิลลิเมตร โดยความยาวท่อช่วง 10-60 มิลลิเมตร มีการให้ฟังก์ชันความร้อนแบบคงที่ สำหรับการไหลแบบสองสถานะของอากาศ-น้ำ พบว่ารูปแบบการไหลที่ทำนายได้จากแบบจำลองได้แก่ รูปแบบการไหลแบบ bubbly flow, slug flow และ elongated slug flow ในส่วนของการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนเมื่อความเร็วที่ทางเข้าของอากาศมีค่าคงที่ จากการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Re_L เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไหลสถานะเดียวและสองสถานะ พบว่าการไหลแบบสองสถานะของน้ำ-อากาศให้ค่า Nu ที่สูงกว่าการไหลสถานะเดียวคิดเป็น 107.96 % ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าของไหลสองสถานะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าของไหลสถานะเดียว

NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN RECTANGULAR CHANNELS

Sorawit	lamsonthi	57011315
Wisarat	Tayanuwat	57011189
Aphiphu	Atcharawan	57011477
Dr.Maturose	Suchatawat	Advisor

Year 2017

ABSTRACT

This thesis presents a numerical study of flow behaviors and heat transfer characteristics in rectangular channels. The working fluids considered are water for the case of single phase flow and air-water for the case of two-phase flow. The volume of fluid (VOF) method is applied in the model. The rectangular channel is two-dimensional with T-junction at the inlet. The channel width is 0.617 mm and the channel length is 60 mm. Constant heat flux is applied along the channel at the distance of 10 to 60 mm. For air-water two-phase flow, the developed model predicts that the flow patterns occur includes bubbly flow, slug flow and elongated slug flow. It is also found from the heat transfer analysis that, for a constant air inlet velocity, the Nusselt number increases with the increase in the liquid Reynolds number. Comparison of the single phase and two-phase heat transfer reveals that the two-phase flow gives the higher heat transfer rate. The two-phase Nusselt number is found to be 107.96% higher than that of the single phase.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยการให้คำแนะนำและปรึกษาจาก ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และเป็นผู้ตรวจทานต้นฉบับวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ ดร.วิฑาดา เจษฎารัตนชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและความรู้ด้านโปรแกรม ANSYS Fluent

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆและคอยให้กำลังใจเสมอมา

และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและการให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นายสรวิศ เอี่ยมสนธิ
นายวิศรุต ทยานุวัฒน์
นายอภิภู อัจฉรวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ของไหลสองสถานะ.....	5
2.1.1 รูปแบบการไหล (Flow pattern).....	5
2.1.2 การวิเคราะห์การไหลสองสถานะ.....	7
2.1.2.1 แบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous flow model).....	8
2.1.2.2 แบบจำลองการไหลแบบแยกตัว (Separated flow model).....	8
2.1.3 การถ่ายเทความร้อน.....	8
2.1.3.1 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว.....	8
2.1.3.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะ.....	11
2.2 วิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method).....	13
2.2.1 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equations).....	14
2.3 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน SST k-omega (Shear Stress Transport).....	23
2.3.1. สมการ Turbulent kinetic energy (k).....	23
2.3.2. สมการ Specific Dissipation Rate (ω).....	23
2.4 ปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็ว (Pressure-velocity coupled).....	25
2.4.1 SIMPLE.....	25
2.4.2 PISO.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	28
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) และขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid Independence) : Part I.....	28
3.1.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry).....	28
3.1.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing).....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)	34
3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) และขนาดกริดที่ เหมาะสม (Grid Independence) : Part II.....	44
3.2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)	44
3.2.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)	45
3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)	48
3.3 ของไหลสถานะเดียว	48
3.3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)	48
3.3.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)	49
3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)	50
3.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของไหลสถานะเดียว (Validation single phase)	55
3.4 ของไหลสองสถานะ	57
3.4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)	57
3.4.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)	57
3.4.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)	57
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย.....	61
4.1 รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ.....	61
4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	61
4.1.2 ผลลัพธ์รูปแบบการไหลสองสถานะจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข	65
4.2 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน	67
4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	67
4.2.2 ผลลัพธ์การถ่ายเทความร้อนจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	81
5.1 สรุปผลการศึกษา	81
5.1.1 การศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดย ใช้สารทำงานเป็นน้ำ.....	81
5.1.2 การศึกษาคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะและความสามารถในการ ถ่ายเทความร้อน	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
บรรณานุกรม.....	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปแบบการไหลสองสถานะระหว่างแก๊ส-ของเหลวในท่อแนวนอน	6
2.2 แสดงรูปแบบการไหลสองสถานะระหว่างแก๊ส-ของเหลวในท่อแนวตั้ง.....	7
2.3 ภาพแสดงแบบจำลองการไหลแบบแยกตัว A.K. Vij และ W.E. Dunn (1996)	8
2.4 แสดงแบบจำลองของแผ่นคู่ขนาน.....	9
2.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา สิทธิกานต์ นุ่นหนู (2551)	14
2.6 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE	26
2.7 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ PISO.....	27
3.1 แสดงแบบจำลอง 2 มิติ T-junction.....	28
3.2 แสดงขนาดของแบบจำลอง 2 มิติ T-junction มีหน่วยเป็น mm.	28
3.3 แสดงการตั้งค่ารายละเอียดของกริด	29
3.4 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 1	30
3.5 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 2	30
3.6 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 3	31
3.7 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 4	31
3.8 แสดงการตั้งค่า Face Meshing	32
3.9 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 5	32
3.10 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 6	33
3.11 แสดงกริดสุทธิจำนวน 140,000	33
3.12 แสดงการตั้งชื่อเส้นขอบ	34
3.13 แสดงการตั้งค่าที่ General.....	34
3.14 แสดงการตั้งค่าที่ Model	35
3.15 แสดงการตั้งค่าคุณสมบัติของน้ำ.....	35
3.16 แสดงการตั้งค่าคุณสมบัติของไนโตรเจน	36
3.17 แสดงการตั้งค่าลำดับของแต่ละสถานะ	36
3.18 แสดงการตั้งค่าความสัมพันธ์ระหว่างสถานะ.....	37
3.19 แสดงการตั้งค่า Viscous	37
3.20 แสดงการกำหนดความเร็ว, ความดันของและรูปแบบความปั่นป่วนของไนโตรเจน	38
3.21 แสดงการกำหนดสัดส่วนปริมาตรของสถานะน้ำที่ทางเข้าของไนโตรเจน	38
3.22 แสดงการกำหนดความเร็ว, ความดันของและรูปแบบความปั่นป่วนของน้ำ.....	39
3.23 แสดงการกำหนดสัดส่วนปริมาตรของสถานะน้ำที่ทางเข้าของน้ำ.....	39
3.24 แสดงการตั้งค่ามุมสัมผัสระหว่างสถานะน้ำและไนโตรเจน	40
3.25 แสดงการตั้งเงื่อนไขวิธีการแก้หาคำตอบ.....	41
3.26 แสดงค่าปัจจัยที่ช่วยในการแก้หาคำตอบ	41
3.27 แสดงการสมมติคำตอบก่อนการคำนวณเชิงตัวเลข	42
3.28 แสดงการใช้เทคนิค patching.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 แสดงการตั้งค่าในส่วนของเวลาที่ใช้ในการคำนวณการไหลสองสถานะ	43
3.30 แสดงแบบจำลองในโปรแกรม Design Modeler	44
3.31 แสดงขนาดของแบบจำลอง	44
3.32 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing	45
3.33 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing	46
3.34 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing	46
3.35 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing	47
3.36 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing	47
3.37 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing	48
3.38 แสดงขนาดของแบบจำลองใน Design Modeler	49
3.39 แสดงการตั้งชื่อเงื่อนไขขอบเขต	49
3.40 การตั้งเงื่อนไขในโปรแกรม Fluent	50
3.41 แสดงการเลือกแบบจำลองพลังงานและโมเดลความหนืด	50
3.42 แสดงการเลือกคุณสมบัติของน้ำ	51
3.43 แสดงการเลือกคุณสมบัติของท่อ	51
3.44 การตั้งค่าให้พื้นที่เป็นแต่สถานะน้ำ	52
3.45 แสดงการตั้งค่าพลักซ์ความร้อนที่ผนังส่วนที่ให้ความร้อน	52
3.46 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของสถานะน้ำ	53
3.47 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตอุณหภูมิของสถานะน้ำ	53
3.48 การกำหนด Solution Methods	54
3.49 การกำหนดค่า Convergence Absolute Criteria	54
3.50 รูปแสดงการกำหนดค่าตอบเริ่มต้น	55
3.51 การกำหนดจำนวนการทำซ้ำ	55
3.52 แสดงการเปรียบเทียบอนุกรมระหว่าง Numerical & Analytical	56
3.53 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของของไหลสองสถานะ	57
3.54 การตั้งค่าอันดับของของไหลสองสถานะ	58
3.55 การตั้งค่าอันดับของของไหลสองสถานะ	58
3.56 แสดงการตั้งค่าความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองสถานะ	59
3.57 การตั้งค่า Contact angle ที่ผนังทุกด้านของแบบจำลอง	59
3.58 แสดงการตั้งความเร็วที่ทางเข้าของอากาศ	60
3.59 แสดงการตั้งค่าสัดส่วนปริมาตรที่ทางเข้าของน้ำ	60
4.1 แสดงขนาดของท่อสี่เหลี่ยมที่ทางเข้าตัวที่	61
4.2 แสดงจำนวนกริดที่ 28,000	62
4.3 แสดงจำนวนกริดที่ 61,000	62
4.4 แสดงจำนวนกริดที่ 140,000	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงจำนวนกริดที่ 200,000	63
4.6 แสดงแบบจำลองที่ติดฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของผนังท่อ.....	67
4.7 แสดงจุดที่วัดความดันตกของแบบจำลอง.....	67
4.8 แสดงกราฟความดันตกจากการทดลองของ Choi et al. (2011).....	68
4.9 แสดงผลลัพธ์ที่ได้ของความดันที่กริดต่างๆโดยพิจารณาในช่วง bubble flow region เท่านั้น .	68
4.10 แบบจำลองที่พิจารณาโดยแบ่งช่วงพิจารณา 11 ตำแหน่ง	69
4.11 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลที่ระยะ x ต่างๆ เมื่อเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical) กับค่าที่ได้จากสมการ (Analytical)	71
4.12 แสดงการกระจายตัวของ bulk mean temperature และอุณหภูมิผนังท่อเฉลี่ยที่ระยะ x จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำค่าไปหา Nusselt number ต่างๆได้จากสมการดังต่อไปนี้.....	72
4.13 แสดงค่า Local Nusselt number และ Average Nusselt number ที่ขึ้นกับระยะ x ตามความยาวท่อ.....	73
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเลขนี้สเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสถานะเดียว	74
4.15 แบบจำลองสำหรับการไหลของของไหลสองสถานะที่พิจารณาโดยแบ่งช่วงพิจารณาละเอียดในช่วงที่เกิดฟองแก๊ส	75
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผนังท่อ กับ bulk mean temperature เทียบกับระยะท่อที่ของไหลสองสถานะไหลผ่านที่ความเร็วน้ำ 0.19 m/s	76
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผนังท่อ กับ bulk mean temperature เทียบกับระยะท่อที่ของไหลสองสถานะไหลผ่านที่ความเร็วน้ำ 0.27 m/s	76
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผนังท่อ กับ bulk mean temperature เทียบกับระยะท่อที่ของไหลสองสถานะไหลผ่านที่ความเร็วน้ำ 0.43 m/s	77
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะ x ต่างๆของท่อที่ความเร็วน้ำ 0.19 m/s และความเร็วอากาศ 0.07 m/s.....	77
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะ x ต่างๆของท่อที่ความเร็วน้ำ 0.27 m/s และความเร็วอากาศ 0.07 m/s.....	78
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเทียบที่ระยะ x ต่างๆของท่อที่ความเร็วน้ำ 0.43 m/s และความเร็วอากาศ 0.07 m/s.....	78
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนี้สเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ	79
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนี้สเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสถานะเดียวและการไหลสองสถานะ	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงรูปแบบการไหลสองสถานะที่ความเร็วน้ำและอากาศที่ต่างกัน	65
4.2 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างความยาวฟองของแก๊สจากวิเคราะห์เชิงตัวเลขและผลการทดลองของ Choi และคณะ	66
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสถานะเดียว	74
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ.....	79

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_l	พื้นที่หน้าตัดท่อที่สัมผัสกับของไหล, m^2
A_g	พื้นที่หน้าตัดท่อที่สัมผัสกับของแก๊ส, m^2
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก, m
g	แรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
h	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $W/m \cdot K$
\dot{m}_G	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
\dot{m}_L	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
Nu	ตัวเลขนัสเซล
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
Re_{tp}	ตัวเลขเรย์โนลด์ของไหลสองสถานะ
T	อุณหภูมิ, K
x	ค่าคุณภาพไอ
α	อัตราส่วนด้าน
k	เส้นโค้งรอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-แก๊ส
t	เวลา, s
\hat{n}_w	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผนัง
\hat{i}_w	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับผนัง
θ_w	มุมสัมผัสระหว่างของไหลกับผนัง
$CD_{k\omega}$	สมการ Cross-diffusion สำหรับวิเคราะห์ $k-\omega$
\vec{V}_l	เวกเตอร์ความเร็วของของไหลสถานะของเหลว, m/s
\vec{V}_g	เวกเตอร์ความเร็วของของไหลสถานะแก๊ส, $J/kg \cdot K$
α_l	สัดส่วนปริมาตรของของไหลสถานะของเหลว
α_g	สัดส่วนปริมาตรของของไหลสถานะแก๊ส
x	คุณภาพไอ
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
ρ_L	ความหนาแน่นของของเหลว, kg/m^3
ρ_G	ความหนาแน่นของแก๊ส, kg/m^3
ρ_{TP}	ความหนาแน่นของไหลสองสถานะ, kg/m^3
μ	ความหนืดพลวัต, Ns/m^2
μ	ความหนืดพลวัตของของไหลสถานะเดียว, Ns/m^2
σ	แรงตึงผิวที่รอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-แก๊ส, N/ms
ω	สมการ Specific Dissipation Rate

μ_{TP}	ความหนืดพลวัตของของไหลสองสถานะ, Ns / m^2
k_f	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล
q''	ฟลักซ์ความร้อน, W / m^2
$h(x)$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะความยาวท่อ x , $W / m^2 \cdot K$
$T_{wall}(x)$	อุณหภูมิที่ผนังท่อโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความยาวของท่อ, K
$T_{fluid}(x)$	อุณหภูมิของของไหลโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความยาวของท่อ, K
T_b	อุณหภูมิของของเหลวเฉลี่ยทุกตำแหน่งตามแนวความกว้างของท่อ, K
u	ความเร็วของไหลตามแนวแกนความยาวท่อ, m / s
y	ระยะความกว้างของท่อ, m
h_{avg}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย, $W / m^2 \cdot K$
L_{ch}	ช่วงความยาวท่อที่มีการให้ฟลักซ์ความร้อน, m
Nu_{avg}	ตัวเลขนัสเซลเฉลี่ย
k_e	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลระหว่างสองสถานะ
k_1	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลของสารทำงาน
k_2	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลของสารทำงาน
v_2	สัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ของสารทำงานที่มีค่า
q_w	ฟลักซ์ความร้อนที่ผนัง, W / m^2
P	เส้นรอบวงของส่วนที่ให้ความร้อน, m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg / s
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะ, $J / kg \cdot K$
U_{avg}	ความเร็วเฉลี่ยตลอดระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน 2 แผ่น, m / s
b	ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน 2 แผ่น, m
d	ความลึกของแผ่นขนาน, m
ϕ	ค่าคุณสมบัติใดๆต่อมวล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการไหลของของไหลในช่องทางการไหลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกต่ำกว่า 1 mm. โดยได้นำการศึกษาการไหลไปประยุกต์ใช้ในเชิงวิศวกรรม ซึ่งการพัฒนากระบวนการถ่ายโอนความร้อน นับเป็นส่วนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในเชิงอุตสาหกรรม เพราะในปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมที่สามารถใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพก็จะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มยอดการผลิตสินค้าในอุตสาหกรรมได้เพิ่มมากขึ้น เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพและการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ประหยัดพลังงานและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จึงต้องมีการศึกษารูปแบบการไหลของของไหลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนให้ดีขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ในการศึกษาการไหลของของไหลมีหลายวิธีเช่น การทดลอง (Experimental method) และการศึกษาเชิงตัวเลข (Numerical method) อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวอาจมีความซับซ้อน, สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมาก ยกตัวอย่างเช่น การกำหนดค่ามุมสัมผัสระหว่างของเหลวและแก๊สในท่อ (Contact angle) จะพบว่าถ้ากำหนดโดยวิธีการทดลองจะยุ่งยากกว่าวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Choi et al. 2011) ต่างจากการศึกษาเชิงตัวเลขที่มีความสะดวกและรวดเร็วมากกว่า

ในงานวิจัยนี้เราจึงเลือกใช้วิธีการศึกษาเชิงตัวเลขซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น สามารถวิเคราะห์ถึงกลไกที่ซับซ้อนของการไหลซึ่งวิธีการทดลองนั้นอาจจะศึกษาได้ยากนอกจากนี้การทำการทดลองยังมีข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทำการทดลอง รวมทั้งสิ้นเปลืองทรัพยากรที่ใช้ในการทำการทดลองอีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการศึกษาเชิงตัวเลขเข้ามาศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการไหลของของไหลก็จะเป็นการช่วยแก้ปัญหาที่เกิดจากการทดลองได้เป็นอย่างดีในการศึกษารูปแบบการไหลนั้นเป็นพื้นฐานสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน ถ้าเกิดการไหลที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน ก็จะทำให้เกิดกระบวนการการถ่ายโอนความร้อนที่แตกต่างกันด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาและพัฒนาการเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนในช่องทางการไหลโดยมีการตรวจสอบด้วยผลการทดลองและการตรวจสอบโดยการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งล้วนแล้วแต่เพื่อวิเคราะห์ทำความเข้าใจถึงกระบวนการที่ของไหลไหลผ่าน ล้วนมีผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งรับอิทธิพลมาจากตัวแปรต่างๆที่ใช้ศึกษา

โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อทำนายรูปแบบการไหลและค่าการถ่ายโอนความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมและศึกษาตัวแปร เช่น การเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลที่มีผลต่อรูปแบบการไหลและค่าการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถนำผลการศึกษาไปช่วยในการออกแบบท่อสี่เหลี่ยมและทำนายรูปแบบการไหลเพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่ดียิ่งขึ้นไปอีก

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อของของไหลสถานะเดียวและของไหลสองสถานะ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลสถานะเดียวกับของไหลสองสถานะ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาโดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของของไหลเพื่อทำนายรูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) และการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)
2. ศึกษาเชิงตัวเลขของรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของของไหลสถานะเดียวและสองสถานะโดยมีสารทำงานที่ใช้คือ น้ำ-อากาศ โดยไม่มีการเดือดของของไหลภายในท่อ
3. พิจารณาเฉพาะการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)
4. ทำการศึกษาเฉพาะส่วนของท่อที่มีการให้ค่าฟลักซ์ทางความร้อนคงที่ (Constant heat flux)

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gupta et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะ (อากาศ-น้ำ) ของรูปแบบการไหลแบบ slug ในท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยมโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent โดยการสร้างกริดที่มีความละเอียดพอที่จะทำให้เกิดฟิล์มของเหลวขึ้นโดยพบว่าแผ่นฟิล์มของเหลวที่ผนังนั้นไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยอาจมีสาเหตุหลักๆมาจากความละเอียดของกริดที่ผนังมีค่าต่ำ ความหนาของฟิล์มของเหลวที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขมีค่า $15 \mu\text{m}$ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าจากสมการสหสัมพันธ์ของ Bretherthon, (1961), Aussillous และ Quere, (2000) ค่าความดันตกต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขมีค่า $94,400 \text{ Pa/m}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากสมการสหสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองของ Kreutzer et al. (2005) นอกจากนี้การไหลแบบ slug ที่มีลักษณะพิเศษโดยมีก้อนแก๊สเกือบเต็มท่อและพบว่ามีฟิล์มของเหลวเกิดขึ้นระหว่างฟองแก๊สและผนังท่อด้วย เนื่องจากการไหลแบบหมุนวนของ slug ในส่วนที่เป็นของเหลวทำให้รูปแบบการไหลแบบ slug มีการถ่ายโอนความร้อนจากของเหลวสู่ผนังดีขึ้น

Choi et al. (2011) ได้ทำการศึกษาค่าความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในรูปแบบการไหลสองสถานะ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตมีการนำท่อกลมขนาดเล็ก (Microtube) มาทำการทดลองซึ่งอาจจะถูกจำกัดการเกิดรูปแบบการไหลในลักษณะต่างๆ จึงมีการสร้างท่อไมโครแชนแนลขึ้นมา และนำท่อไมโครแชนแนลไปทำการทดลองโดยท่อไมโครแชนแนลส่วนใหญ่ที่ถูกนำไปใช้งานนั้นมีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยมและเกิดค่าความดันตกของท่อ ซึ่งค่าความดันตกนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกันอย่างมากต่อรูปแบบการไหลสองสถานะดังนั้น ทางคณะวิจัยจึงต้องการศึกษาการไหลสองสถานะระหว่างน้ำและแก๊สไนโตรเจนในท่อสี่เหลี่ยมระดับไมโครแชนแนลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก $507 \mu\text{m}$ และ $490 \mu\text{m}$ โดยที่กำหนดค่าความสามารถในการกระจายตัวที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งท่อไมโครแชนแนลแบบแรกนั้นมีลักษณะเป็นแก้วที่ทำจากวัสดุที่ไวต่อแสงเรียกหน้าสัมผัสของผิวแก้วว่า Hydrophilic และแบบที่สองเป็นการฉาบด้วยสาร Octadecyl trichloro silane ลงบนผิวท่อจะทำให้ค่าความสามารถในการกระจายตัวเปลี่ยนไปเป็นลักษณะ Hydrophobic วิธีการสังเกตรูปแบบการไหลสองสถานะนั้นจะสังเกตได้ด้วยกล้องจับภาพความเร็วสูงและมีระยะจับภาพที่กว้างในส่วนของการวัดความดันตกเนื่องจากแรงเสียดทานที่น้อยนั้นวัดโดยเกจวัดความดัน (Pressure gauge) ที่ถูกติดตั้งในตำแหน่งต่างๆที่ต้องการทราบค่า จากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะของรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในกรณี Hydrophilic ได้แก่ bubble, elongated bubble และ liquid ring ส่วนในกรณี Hydrophobic ได้แก่ รูปแบบการไหลแบบ stratified เป็นส่วนใหญ่ ความดันตกที่

เกิดขึ้นในกรณี Hydrophilic จะมีค่าสูงกว่าความดันตกที่เกิดขึ้นในกรณี Hydrophobic จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความดันตกนั้นมีค่าเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลสองสถานะที่มีค่าความสามารถในการกระจายตัวที่ต่างกัน

Padoin et al. (2016) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะ (ไนโตรเจน-น้ำ) โดยจำลองขนาดท่อมาจากการทดลองของ Choi et al. (2011) เป็นระนาบ 2 มิติ มีความกว้าง 617 μm และ 608 μm ในท่อไมโครแชนแนลที่สถานะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Isothermal) โดยใช้แบบจำลอง Volume of fluid (VOF) และให้ผนังที่สัมผัสกับของไหลเป็นพื้นผิวที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่มีมุมสัมผัสคือ 25° และผนังที่สัมผัสกับของไหลเป็นพื้นผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ที่มีมุมสัมผัสคือ 105° โดยผลลัพธ์จากคำนวณเชิงตัวเลขได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Choi et al. (2011) พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมสัมผัสที่ผนังทำให้รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นและค่าความดันตกมีความแตกต่างกันโดยรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในกรณี Hydrophilic ได้แก่ bubble, elongated bubble และ liquid ring ส่วนในกรณี Hydrophobic ได้แก่รูปแบบการไหลแบบ stratified ค่าความดันตกที่เกิดขึ้นของฟองแก๊สในการคำนวณเชิงตัวเลขมีค่า 48 Pa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความดันตกที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์จากการทดลองของ Choi et al. (2011)

DongyingQian และ AdeniyiLawal (2006) ได้ทำการศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลองการไหลสองสถานะ (น้ำ-อากาศ) แบบ slug flow ในท่อไมโครแชนแนลรูปตัว T โดยการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดด้านกว้างที่ทางเข้าเป็น 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 และ 3 mm. โดยใช้ Computational fluid dynamics (CFD) ในแบบจำลองนี้ ความยาวของรูปแบบการไหล slug ที่สถานะเงื่อนไขของของไหลเปลี่ยนไปพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการทดลอง โดย ความยาวของสถานะแก๊สที่รูปแบบการไหล slug เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นและความเร็วของของเหลวลดลง ความยาวของส่วนที่เป็นของเหลวที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มขึ้นและความเร็วของแก๊สลดลง ช่องทางเข้าด้านกว้างยิ่งมากขึ้นทำให้มีความยาวของฟองแก๊สยาวขึ้น ที่ความเร็วของแก๊สและความเร็วของของเหลวเท่ากันผลของแรงโน้มถ่วงไม่มีผลต่อท่อไมโครแชนแนล ผลกระทบของความหนาแน่นและความหนืดของของไหลไม่มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหล แต่แรงตึงผิว (surface force) และแรงยึดติด (adhesion force) ที่ผนังมีผลกระทบในระดับหนึ่งกับความยาวของฟองแก๊ส

Adam et al.(2006) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในงานวิจัยนั้นได้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent ซึ่งตรวจสอบค่าจากการที่กำหนดกรณีศึกษาออกเป็นสองแบบ โดยกำหนดให้อากาศเป็นสารทำงาน โดยเป็นการไหลแบบราบเรียบ ระหว่างแผ่นขนานสองแผ่นภายใต้เงื่อนไขทางความร้อนที่แตกต่างกัน ในกรณีแรกได้กำหนดให้แผ่นขนานมีค่าอุณหภูมิที่ผนังคงที่ ในกรณีที่สอง กำหนดแผ่นขนานมีค่าฟลักซ์ทางความร้อนคงที่ ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นจะมีการตรวจสอบความเหมาะสมของกริดโดยเทียบจากการประมาณค่าของทฤษฎี Richardson Extrapolation จากการตรวจสอบผลโดยการเปรียบเทียบการคำนวณเชิงตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบราบเรียบของอากาศระหว่างแผ่นขนานโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขจากซอฟต์แวร์เปรียบเทียบกับข้อมูลทางทฤษฎีภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พบว่ามีค่าความผิดพลาดเทียบกับข้อมูลทางทฤษฎีคิดเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่า 0.01%

Amirah et al.(2017) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก และอัตราส่วนช่องว่าง ที่มีผลต่อการไหลของของไหลสถานะเดียวและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กซึ่งในการคำนวณเชิงตัวเลขของแบบจำลองได้มีการกำหนดให้ค่าพลักซ์ทางความร้อนคงที่กับผนังทั้งสามด้าน แต่ในส่วนผนังด้านบนเป็นด้านที่ไม่มีการให้ความร้อน เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกถูกเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 มิลลิเมตร และกำหนดให้อัตราส่วนช่องว่างมีค่าเท่ากับ 1 และเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนช่องว่างให้มีค่าระหว่าง 0.39 ถึง 10 ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกมีค่าคงที่คือ 0.56 มิลลิเมตร จากแบบจำลองเชิงตัวเลข คำนวณได้ช่วงของค่าเรย์โนลด์มีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ โดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าอัตราส่วนช่องว่างไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกกับค่าการถ่ายเทความร้อนมีความสัมพันธ์กัน

Gupta et al.(2009) ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (อากาศ-น้ำ) ของรูปแบบการไหลแบบ slug ในท่อกลมขนาดไมโครแชนแนลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent และ TransAT codes โดยระเบียบวิธี Volume of fluid (VOF) และระเบียบวิธี Level-set โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขของทั้งสองโปรแกรมนั้นมีค่าผลลัพธ์ใกล้เคียงและสัมพันธ์กันสำหรับการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบเต็มรูปแบบ และค่าถ่ายโอนความร้อนที่ได้ทำการศึกษา โดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเป็น 280 ตัวเลขคาบิลารี เป็น 0.006 อัตราส่วนช่องว่างเป็น 0.51 ค่าพลักซ์ทางความร้อนคงที่และอุณหภูมิที่ผนังคงที่ถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขของขอบเขตในการศึกษา พบว่าตัวเลขนัสเซลที่ได้จากทั้งสองกรณีมีค่า 2.5 เท่าของการไหลที่มีแต่น้ำอย่างเดียว โดยสัดส่วนของค่านัสเซลต่อของไหลที่เป็นน้ำอย่างเดียวมีค่าสูงกว่าหนึ่ง และเพิ่มขึ้นจาก 1.9 ถึง 3.3 เมื่ออัตราส่วนช่องว่างลดลงจาก 0.7 ไปจนถึง 0.3 และยังคงที่ที่ความเร็วของของผสมที่ 0.3-1.0 m/s

บทที่ 2

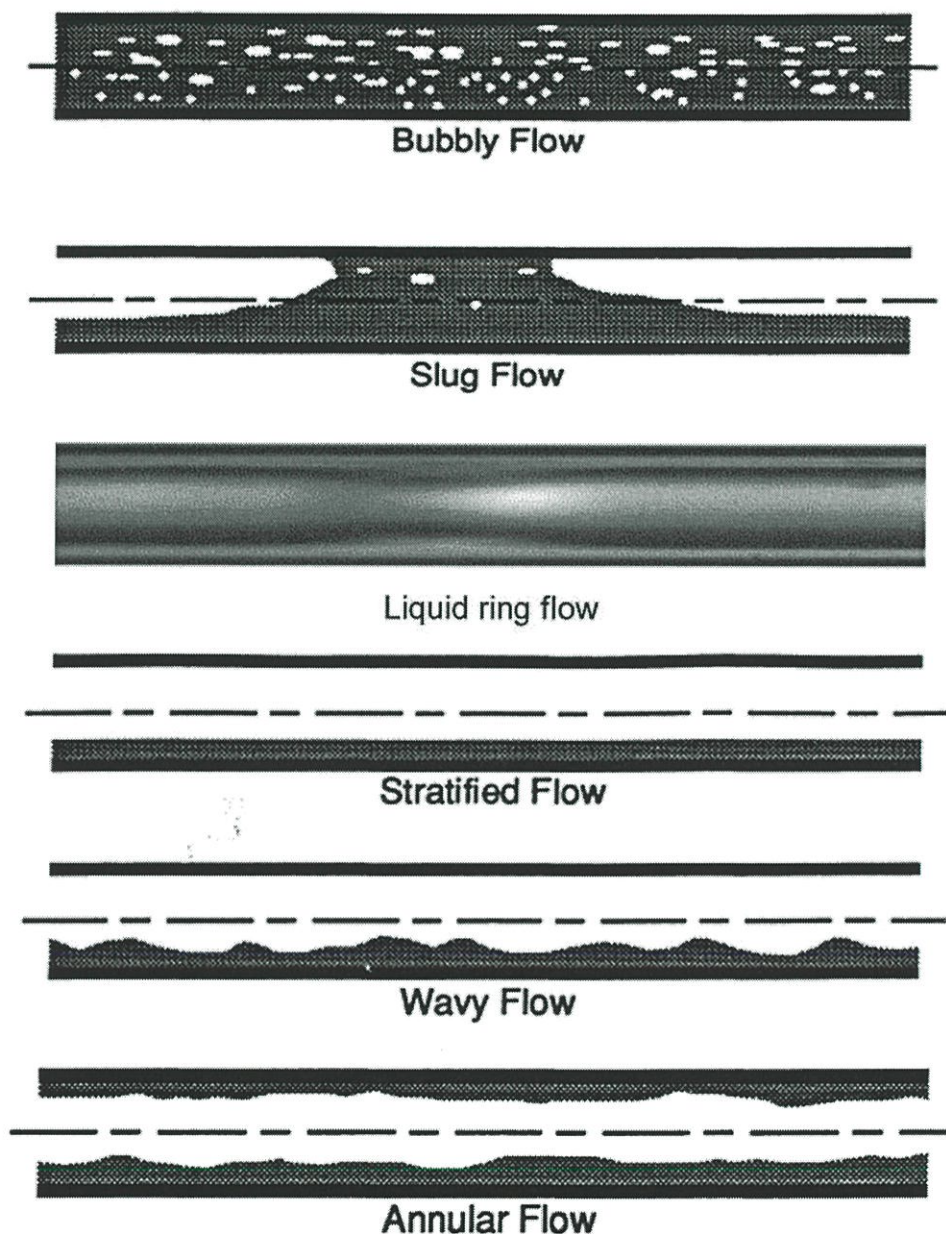
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของไหลสองสถานะ

2.1.1 รูปแบบการไหล (Flow pattern)

รูปแบบการไหลที่เกิดในท่อจะมีลักษณะขึ้นอยู่กับการจัดวางท่อโดยสามารถแบ่งเป็น 6 รูปแบบการไหลสำหรับการจัดวางท่อแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2.1 ได้ดังนี้

1. Bubbly flow คือการไหลที่เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวฟองแก๊สมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกโดยรูปแบบการไหลลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของเหลวมีค่าสูงและความเร็วแก๊สมีค่าต่ำ
2. Slug flow รูปแบบการไหลแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วแก๊สและความยาวของฟองแก๊สจะยาวขึ้นโดยจะมีฟิล์มของเหลวอยู่ระหว่างฟองแก๊สและผนังท่อ
3. Liquid ring flow รูปแบบการไหลนี้ความเร็วของของเหลวมีค่าต่ำส่วนความเร็วของแก๊สนั้นมีค่าสูง รูปแบบการไหลแบบ liquid ring flow นั้นพัฒนามาจากรูปแบบการไหลแบบ slug flow ซึ่งการไหลแบบ liquid ring flow จะมีลักษณะเป็นฟองอากาศยาวไหลไปในแนวแกนและมีส่วนที่เป็นคอคอดซึ่งไม่ขาดออกจากกัน
4. Stratified flow รูปแบบการไหลนี้เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของทั้งสถานะแก๊สและของเหลวมีค่าต่ำลักษณะการไหลคือมีการแยกชั้นกันของแก๊สและของเหลวโดยแก๊สจะอยู่ด้านบนและของเหลวจะอยู่ด้านล่างซึ่งเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงโดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะราบเรียบ
5. Wavy flow มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยแก๊สจะอยู่ด้านบนและของเหลวจะอยู่ด้านล่าง โดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะมีลักษณะเป็นคลื่น
6. Annular flow ลักษณะของรูปแบบการไหลนี้จะมีส่วนที่เป็นแก๊สไหลต่อเนื่องอยู่ที่กลางท่อ (gas core) และตรงกลางเป็นแก๊สล้อมรอบด้วยของเหลวลักษณะคล้ายคลื่น



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการไหลสองสถานะระหว่างแก๊ส-ของเหลวในท่อแนวนอนของ Dobson (1994) และ Serizawa et al. (2002)

สามารถแบ่งเป็น 4 รูปแบบการไหลสำหรับการจัดวางท่อแนวดิ่งได้แสดงดังรูปที่ 2.2 ได้ดังนี้

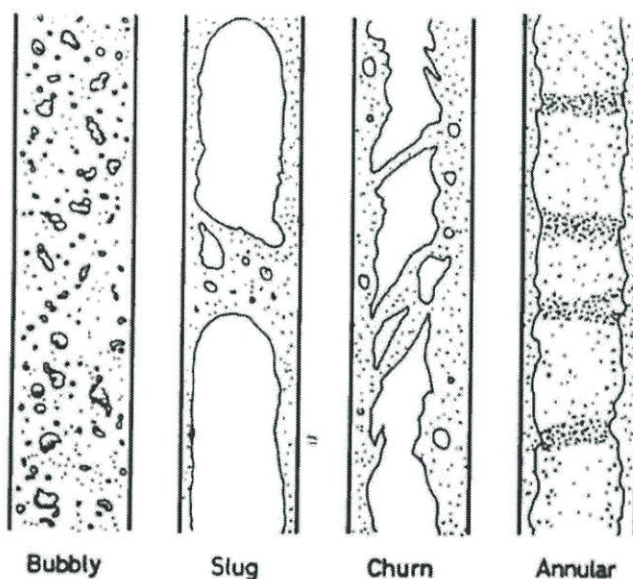
1. Bubbly flow สำหรับรูปแบบการไหลนี้ ลักษณะฟองแก๊สขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในท่อโดยมีลักษณะของฟองแก๊สใกล้เคียงกับทรงกลมและมีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ปนกัน

2. Slug flow ในรูปแบบการไหลนี้ ฟองแก๊สจะมีลักษณะคล้ายหัวกระสุนปืน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊สใกล้เคียงเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโดยมีลักษณะฟองแก๊สที่ยาว โดยส่วนที่ยาวนี้เรียกว่า slug bubble และเรียกส่วนที่เป็นของเหลวว่า liquid slug ซึ่งใน liquid slug

จะมีฟองแก๊สขนาดเล็กกระจายตัวอยู่เล็กน้อย โดยจะมีฟิล์มของเหลวอยู่ระหว่างฟองแก๊สและผนังท่อ

3. Churn flow เป็นรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงมาจาก slug flow โดยเพิ่มความเร็วของแก๊สจนทำให้ฟองแก๊สหัวกระสุน (slug bubble) เกิดการเปลี่ยนรูปร่างและแตกตัว ในส่วนของฟิล์มของเหลวอยู่ระหว่างฟองแก๊สและผนังท่อจะเกิดการรวมตัวกับส่วน liquid slug

4. Annular flow ลักษณะของรูปแบบการไหลนี้จะมีส่วนที่เป็นแก๊สไหลต่อเนื่องอยู่ที่กลางท่อ (gas core) และของเหลวสามารถแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นฟิล์มบางที่ขอบท่อรอบแก๊ส และส่วนที่มีลักษณะเป็นหยดของเหลวกระจายตัวใน gas core โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สกับของเหลวมีลักษณะเป็นคลื่น



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการไหลสองสถานะระหว่างแก๊ส-ของเหลวในท่อแนวตั้ง

Joseph S. Miller (2010)

2.1.2 การวิเคราะห์การไหลสองสถานะ

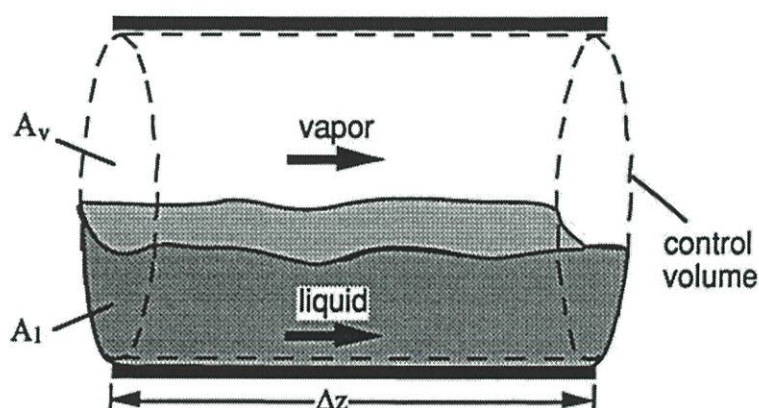
สำหรับการไหลแบบสองสถานะจะมีความซับซ้อนมากกว่าการไหลแบบสถานะเดียว โดยในการวิเคราะห์การไหลสองสถานะให้อยู่ในรูปแบบการอย่างง่ายนั้นจำเป็นต้องใช้สมการพื้นฐานในการวิเคราะห์ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมกับการสร้างแบบจำลองช่วยในการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองสำหรับการไหลแบบสองสถานะที่ใช้แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

2.1.2.1 แบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous flow model)

แบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียวถือว่าการไหลในแต่ละสถานะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันโดยมีความเร็วที่ใช้ร่วมกันทั้งแก๊สและของเหลวเป็นค่าเฉลี่ยที่มาจากทั้งสองสถานะและมีคุณสมบัติอื่นๆเช่น ความหนาแน่น, ความหนืดเสมือนเป็นของไหลสถานะเดียว

2.1.2.2 แบบจำลองการไหลแบบแยกตัว (Separated flow model)

แบบจำลองการไหลแบบแยกส่วนจะพิจารณาว่าของไหลทั้งสองเฟสไม่ได้รวมเป็นเนื้อเดียวกันและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันโดยแบบจำลองนี้จะมีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงของการไหลสองสถานะโดยจะแบ่งพื้นที่การไหลเป็นพื้นที่ของเหลว (A_l) และพื้นที่ของแก๊ส (A_g) แยกกันอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงแบบจำลองการไหลแบบแยกตัวของ A.K. Vij และ W.E. Dun (1996)

2.1.3 การถ่ายเทความร้อน

สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยติดอุปกรณ์ให้ความร้อน (Constant heat flux) ของแผ่นคู่ขนานทั้งสองด้านในทิศตรงกันข้ามระหว่างภาชนะ สามารถแยกพิจารณาได้สองรูปแบบการไหล คือ การให้ความร้อนของของไหลสถานะเดียว (Single-phase flow) และการให้ความร้อนของของไหลสองสถานะ (Two-phase flow) โดยพิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) และตัวแปรไร้มิติตัวเลขนัสเซล (Nusselt number) ที่แต่ละความเร็วของสารทำงานที่ต่างกัน

2.1.3.1 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว

สำหรับการให้ความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดยสารทำงานที่ใช้เป็นสถานะของเหลว (Liquid) ถ้าต้องการพิจารณาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) จะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Re} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (2.1)$$

โดยที่ Re คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว

v คือ ความเร็วที่ทางเข้าของของไหล

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยม

μ คือ ความหนืดพลวัตของของไหลสถานะเดียว

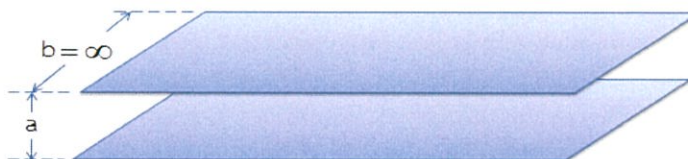
สำหรับผลลัพธ์ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ได้สามารถแบ่งลักษณะการไหลได้สองรูปแบบคือการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โดยใช้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์แบ่งลักษณะการไหลตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$\text{Re} < 2300$ จะเป็นรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ

$2300 \leq \text{Re} \leq 4000$ จะเป็นช่วงเปลี่ยนผ่านลักษณะการไหล

$\text{Re} > 4000$ จะเป็นรูปแบบการการไหลแบบปั่นป่วน

โดยเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกสำหรับของไหลสถานะเดียวและสองสถานะจะใช้แบบจำลองแผ่นขนาน 2 แผ่น ในลักษณะสองมิติความลึกของแผ่นจะมีค่านันต์ดังรูป



รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของแผ่นคู่ขนาน

ดังนั้นหากพิจารณาจากรูปที่ 2.4 และสมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกจะได้สมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกสำหรับแบบจำลองแผ่นคู่ขนาน ในลักษณะสองมิติได้สมการ

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{4ab}{2b} = 2a \quad (2.1a)$$

โดยที่ a คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน

b คือ ความลึกของแผ่นคู่ขนาน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของของไหลโดยค่าขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเร็วของของไหล รูปทรงของวัสดุพื้นที่ที่ของไหลไหลผ่าน ผลต่างอุณหภูมิระหว่างตัวกลางความร้อนกับผิววัสดุ ตำแหน่งต่างๆตามผิวของวัตถุ สมบัติทางกายภาพของของไหล เป็นต้น

โดยจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความยาวของท่อได้จากสมการที่ 2.2

$$h(x) = \frac{q''}{T_{wall}(x) - T_{fluid}(x)} \quad (2.2)$$

โดยที่ $h(x)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะความยาวท่อ x

q'' คือ ฟลักซ์ความร้อน

$T_{wall}(x)$ คือ อุณหภูมิที่ผนังท่อโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความยาวของท่อ

$T_{fluid}(x)$ คือ อุณหภูมิของของไหลโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความยาวของท่อ

และสามารถหา $T_{fluid}(x)$ ได้จากการเฉลี่ยอุณหภูมิทุกตำแหน่งตามความกว้างท่อที่ของไหลไหลผ่านเรียกว่า Bulk mean temperature (T_b) โดยมีสมการคือ

$$T_b = \frac{\int_0^y uyTdy}{\int_0^y uydy} \quad (2.3)$$

โดยที่ T_b คือ อุณหภูมิของของไหลเฉลี่ยทุกตำแหน่งตามแนวความกว้างของท่อ

u คือ ความเร็วของไหลตามแนวแกนความยาวท่อ

y คือ ระยะความกว้างของท่อ

T คือ อุณหภูมิของของไหล ณ ตำแหน่งที่พิจารณา

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยระหว่างผนังท่อกับของไหลได้จากสมการที่ (2.4)

$$h_{avg} = \frac{1}{L_{ch}} \int_0^{L_{ch}} h(x) dx \quad (2.4)$$

โดยที่ h_{avg} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

L_{ch} คือ ช่วงความยาวท่อที่มีการให้ฟลักซ์ความร้อน

และสามารถหาค่าตัวเลขนี้สเซลเฉพาะได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Nu_x = \frac{h(x)D_h}{k_f} \quad (2.5)$$

โดยที่ $h(x)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะความยาวต่อ x
 k_f คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

จากสมการที่ 2.4 ข้างต้นจะสามารถหาค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยได้โดยใช้สมการที่ 2.6

$$Nu_{avg} = \frac{h_{avg}D_h}{k_f} \quad (2.6)$$

ซึ่ง Nu_{avg} และ h_{avg} คือ ตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามลำดับ

2.1.3.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะ

สำหรับการให้ความร้อนของของไหลสองสถานะโดยสารทำงานที่ใช้เป็นสถานะแก๊ส (gas) และของเหลว (Liquid) ถ้าต้องการพิจารณาค่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ซึ่งพิจารณาในลักษณะที่คล้ายกับหัวข้อ 2.1.3.1 แต่พิจารณาของไหลทั้งสองเป็นแบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous flow model) โดยสามารถหาความหนาแน่นสองสถานะและสัมประสิทธิ์ค่าความหนืดเสมือนเป็นของไหลสถานะเดียวของสองสถานะจากสมการต่อไปนี้

$$\rho_p = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

โดยที่ ρ_p คือ ความหนาแน่นของสองสถานะโดยพิจารณาของไหลแบบเนื้อเดียว

x คือ คุณภาพเชิงไอ

ρ_g คือ ความหนาแน่นของไหลสถานะแก๊ส

ρ_l คือ ความหนาแน่นของไหลสถานะของเหลว

และหาสัมประสิทธิ์ค่าความหนืดพลวัตเสมือนเป็นของไหลสถานะเดียวของสองสถานะจากสมการ 2.8

$$\mu_p = \left(\frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

โดยที่ μ_{tp} คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดพลวัตของสองสถานะโดยพิจารณาของไหลแบบเนื้อเดียว
 x คือ คุณภาพเชิงไอ
 μ_g คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดพลวัตของไหลสถานะแก๊ส
 μ_l คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดพลวัตของไหลสถานะของเหลว
 ซึ่ง x คุณภาพเชิงไอสามารถหาได้จากสมการที่ (2.9)

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (2.9)$$

โดยที่ \dot{m}_L และ \dot{m}_G คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวและแก๊ส ตามลำดับ

จากสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8 จะสามารถหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ของของไหลสองสถานะที่พิจารณาของไหลทั้งสองเป็นแบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียวโดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Re}_{tp} = \frac{\rho_{tp} v_{tp} D_h}{\mu_{tp}} \quad (2.10)$$

โดยที่ Re_{tp} คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะ
 ρ_{tp} คือ ความหนาแน่นของของไหลสองสถานะ
 v_{tp} คือ ความเร็วที่ทางเข้าของของไหล
 D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อสี่เหลี่ยม
 μ_{tp} คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดพลวัตของของไหลสองสถานะ

ในส่วนของการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) ของของไหลสองสถานะและตัวแปรไร้มิติตัวเลขนัสเซล (Nusselt number) สองสถานะซึ่งสามารถพิจารณาจากสมการที่เหมือนกันกับการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดยพิจารณาจากแบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียวหรือ Homogeneous flow model คือสมการที่ 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 และ 2.6

โดยในส่วนของสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตัวแปร k สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลที่ใช้จะต้องเป็นของของไหลสองสถานะโดยมีสมการคือ

$$k_e = \left(k_1 \frac{2k_1 + k_2 - 2(k_1 - k_2)v_2}{2k_1 + k_2 + (k_1 - k_2)v_2} \right) \quad (2.11)$$

โดยที่ k_c คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลระหว่างสองสถานะ

k_1 คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลของสารทำงานที่มีค่ามากกว่า

k_2 คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลของสารทำงานที่มีค่าน้อยกว่า

ν_2 คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ของสารทำงานที่มีค่า k มากกว่า

จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสารที่ใช้คือ น้ำและอากาศ ดังนั้นค่า k_1 จึงเป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำและ k_2 จึงเป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศและ ν_2 คือสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ของน้ำ

2.2 วิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method)

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics : CFD) ในอดีตการทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ของการไหล การถ่ายเทความร้อนรวมถึงปรากฏการณ์อื่นๆจำเป็นต้องพึ่งพาการทดลอง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลานานรวมถึงอาจต้องนำกลับไปทดลองซ้ำในกรณีที่มีการแก้ไข เปลี่ยนแปลงแบบจำลอง โดยที่ไม่ทราบว่ารูปแบบที่เปลี่ยนไปนั้นอาจทำให้ได้ผลที่ดีขึ้นหรือแย่ลงอย่างไร เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้จึงได้นำเอาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเข้ามาใช้สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนโดยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) ที่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ซึ่งประกอบด้วยสมการของการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม สมการเหล่านี้สามารถแก้หาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) หรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นต้น ซึ่งระเบียบวิธีทางตัวเลขนี้จะเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้อธิบายพฤติกรรมทางกายภาพ ให้เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของการบวก ลบ คูณ หาร ซึ่งสามารถหาผลเฉลยได้ง่ายขึ้น การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลนี้ไม่ได้เข้าแทนที่ทฤษฎีหรือการทดลอง หากแต่เป็นเพียงการเสริมสร้างความเข้าใจ และยืนยันผลที่ได้จากทฤษฎีและการทดลองสำหรับการไหลของของไหลที่มีความหนืด เป็นการไหลที่รวมผลที่เกิดจากการกระจายตัว และ ปรากฏการณ์ที่เกิดจากความหนืด โดยสมการควบคุม (Governing Equations) ที่เขียนในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation Form) ของการไหลของของไหลที่มีความหนืด (Viscous flow) ที่ใช้สำหรับกรณีการไหลอยู่ในสถานะชั่วคราว (Transient state), ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ซึ่งสามารถแสดงสมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์ 3 สมการคือ

- 1) สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)
- 2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Single Momentum equation)
- 3) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation)

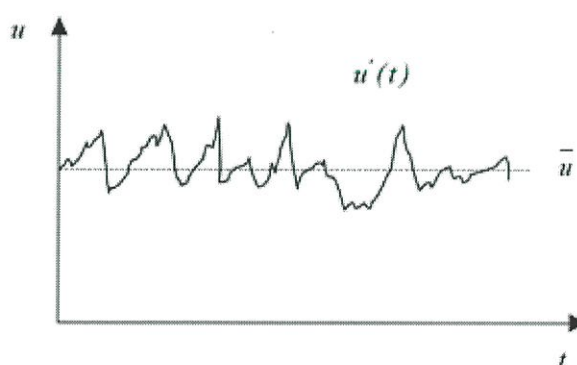
โดยที่การไหลสามารถอธิบายด้วยกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ ดังนี้

- มวลของไหลไม่สูญหาย
- อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล
- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำในอนุภาคของไหล

ของไหลจะถูกพิจารณาว่ามีความต่อเนื่องสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหลที่ระดับมหภาค คือพิจารณาที่ขนาดระดับ $1 \mu\text{m}$ ขึ้นไป โครงสร้างและการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลสามารถไม่นำมาพิจารณาได้ โดยสนใจที่จะอธิบายพฤติกรรมของไหลในเทอมคุณสมบัติในระดับมหภาค เช่น ความเร็ว, ความดัน, ความหนาแน่น, อุณหภูมิ รวมทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ

2.2.1 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equations)

ปกติแล้วค่าของตัวแปรในการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าไม่คงที่โดยค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่น ความเร็วที่แสดงในภาพที่ 2.4 จะพบว่ากราฟของความเร็วยกกับเวลามีความผันผวนมากทำให้การคำนวณตัวแปรมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนจึงแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยที่ไม่ขึ้นกับเวลา (\bar{u}) หรือกราฟเส้นตรงและส่วนที่มีความผันผวนกับเวลา $u'(t)$



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา สิทธิกานต์ นุ่นหนู (2551)

โดยสมการพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วนคือ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการโมเมนตัม (Momentum equation) โดยสามารถเขียนสมการทั้งสองให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ (Tensor) ได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. สมการความต่อเนื่องหรืออนุรักษมวล (Continuity equation)

ขั้นตอนแรกในอนุพันธ์ของสมการอนุรักษมวลคือการเขียนสมการสมดุลมวลของชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล

โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของของไหลคือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (2.12)$$

อัตราการไหลเชิงมวลผ่านพื้นผิวและชิ้นส่วนย่อย ซึ่งนิยามโดยผลคูณของความหนาแน่นพื้นที่ผิวและความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น โดยอธิบายโดยสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2.13)$$

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มมากขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวกและมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อยโดยอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยเท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย โดยผลลัพธ์ของสมดุลมวลจะถูกเรียบเรียงทางซ้ายของสมการและถูกหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย δx , δy , δz ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.14)$$

หรือในรูปแบบของเวกเตอร์

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.15)$$

โดยสำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) เช่น น้ำมีค่าความหนาแน่น ρ เป็นค่าคงที่และสมการที่ 2.16 จะเป็น

$$\text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.16)$$

หรือในรูปแบบเต็มคือ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \bar{V}_s = 0 \quad (2.18)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่น, t คือ เวลา, \bar{V}_s คือ ความเร็ว

จากสมการที่ 2.18 เมื่อแยกเป็นสมการความต่อเนื่องในแต่ละสถานะจะได้สมการที่ 2.19 และ 2.20 คือสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla(\alpha_l \rho_l \bar{V}_l) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla(\alpha_g \rho_g \bar{V}_g) = 0 \quad (2.20)$$

โดย α_l คือ สัดส่วนปริมาตรของสถานะของเหลว, α_g คือ สัดส่วนปริมาตรของสถานะแก๊ส (Volume fraction of fluid), ρ_l คือ ความหนาแน่นของสถานะของเหลว, ρ_g คือ ความหนาแน่นของสถานะแก๊ส, \bar{V}_l คือความเร็วของสถานะของเหลว, \bar{V}_g คือความเร็วของสถานะแก๊สและ t คือ เวลา

อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอนุภาคของไหล ในเทอมชิ้นส่วนย่อยของไหล

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

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

และโดยที่ $\frac{dx}{dt} = u$, $\frac{dy}{dt} = v$ และ $\frac{dz}{dt} = w$ หากแทนค่าดังกล่าวไปในสมการข้างบนจะได้ว่า

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \frac{\partial\phi}{\partial x} + v \frac{\partial\phi}{\partial y} + w \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \quad (2.21)$$

$\frac{D\phi}{Dt}$ เป็นนิยามของอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยมวล ในกรณีของสมการอนุรักษ์มวล เราสนใจที่จะพัฒนาสมการสำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ สามารถถูกแปลงให้เป็นคุณสมบัติเชิงปริมาตรได้โดยการคูณความหนาแน่น ρ เข้าไปกับเทอม $\frac{D\phi}{Dt}$ ดังนั้น

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right) \quad (2.22)$$

รูปแบบนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของของไหล ในปริมาตรเล็กๆที่หยุดนิ่ง เป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่าง 1. อนุพันธ์ของคุณสมบัติ ϕ ของอนุภาคของไหลกับ 2. อัตราเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในชิ้นส่วนหรือปริมาตรย่อยๆ ของของไหลนั้น

ต่อไปนี้หากเราหันมาพิจารณากฎการอนุรักษ์ของมวล ค่าของมวลต่อหน่วยปริมาตร ในที่นี้คือความหนาแน่น ρ คือตัวแปรที่เราศึกษา เมื่อพิจารณาผลรวมของ 1. อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในปริมาตรเล็กๆ และ 2. ผลของการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการพาในสมการอนุรักษ์มวล 2.15 ก็คือ

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

ดังนั้นรูปทั่วไปของ เทอมทั้งสองนี้ สำหรับคุณสมบัติใดๆของของไหล ϕ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) \quad (2.23)$$

สมการที่ 2.23 เทอมแรก คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ϕ ต่อหน่วยปริมาตรบวกกับ เทอมที่สอง คือการไหลสุทธิของ ϕ ต่อปริมาตรที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล ซึ่งเราสามารถนำมา เขียนใหม่เพื่อให้ได้ภาพความสัมพันธ์ ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมนี้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในอนุภาคของไหล ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \rho \left[\frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right] + \phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right] = \rho \frac{D\phi}{Dt} \quad (2.24)$$

เทอม $\phi \left[\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right]$ เท่ากับศูนย์เนื่องจากสมการอนุรักษ์มวลสมการที่ 2.15 จาก

ความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ 2.24 จะได้ว่า

อัตราการเพิ่มของ ϕ สำหรับชิ้นส่วนย่อย ของของไหล	+ อัตราการไหลสุทธิของ ϕ ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล	= อัตราการเพิ่มของ ϕ สำหรับอนุภาคของไหล
------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------	-------------------------------------------------

เพื่อที่จะสร้างองค์ประกอบของสมการโมเมนตัมและสมการพลังงานซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของ ϕ และ อัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ถุณนิยมในสมการ (2.22) และ (2.24)

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

ในแบบจำลอง Volume of fluid (VOF) สัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ซึ่งใช้ในการแบ่งสถานะของแก๊สและของเหลวโดยสมมติให้สถานะแรก คือ สถานะของเหลวและสถานะที่สองคือสถานะของแก๊ส ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\alpha_l = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & : \text{เต็มไปด้วยสถานะของเหลว} \\ 0 & : \text{ไม่มีสถานะของเหลว} \\ 1-0 & : \text{ช่วงรอยต่อระหว่างสถานะ} \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

ดังนั้นค่าสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของสถานะแก๊สหาได้จากสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (2.26)$$

โดย α_l คือ สัดส่วนปริมาตรของสถานะของเหลว, α_g คือ สัดส่วนปริมาตรของสถานะแก๊ส

2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \left[\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) + \sigma k \frac{\rho \nabla \alpha_g}{0.5 \times (\rho_l + \rho_g)} \right] \quad (2.27)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นผสมระหว่างสองสถานะ, \vec{v} คือ ความเร็วผสมของสองสถานะ, P คือ สหามความดัน, μ คือ ความหนืดพลวัตของสองสถานะ, σ คือ แรงตึงผิวที่รอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-แก๊ส, k คือ เส้นโค้งรอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-แก๊ส, α_g คือ สัดส่วนปริมาตรของแก๊ส

จากสมการที่ 2.27 ความหนาแน่นผสมของสองสถานะ (ρ) และความหนืดพลวัตของสถานะ (μ) หาได้จากกฎของ Volume-weighted mixture ดังสมการที่ 2.28 และ 2.29

$$\rho = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l \quad (2.28)$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + (1 - \alpha_g) \mu_l \quad (2.29)$$

โดยที่ α_g คือ สัดส่วนปริมาตรของแก๊ส, ρ_g คือ ความหนาแน่นของสถานะแก๊ส, α_l คือ สัดส่วนปริมาตรของสถานะของเหลว, ρ_l คือ ความหนาแน่นของสถานะของเหลว

ค่าของเส้นโค้งรอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-แก๊ส (k) หาจากแบบจำลองของ Brackbill et al. (1992) โดยหาจากสมการที่ 2.29

$$k = \nabla \cdot \hat{n} \quad (2.30)$$

$$n = \nabla \alpha_l \quad (2.31)$$

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \quad (2.32)$$

โดยสมการที่ 2.31 เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-แก๊สและสมการที่ 2.32 เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย

ผนังที่มีเอลิเมนต์ติดกันในทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยระบุค่ามุมสัมผัสจากสมการดังต่อไปนี้

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos \theta_w + \hat{t}_w \sin \theta_w \quad (2.33)$$

โดย \hat{n}_w เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผนัง \hat{i}_w เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับผนัง θ_w เป็นมุมสัมผัสค่า θ_w ที่น้อยกว่า 90° คือ Hydrophilic หรือผนังที่สัมผัสกับของไหลมีพื้นผิวในการกระจายตัวได้ดีขณะที่ θ_w มากกว่า 90° จะเป็น Hydrophobic หรือผนังที่สัมผัสกับของไหลมีพื้นผิวกระจายตัวที่ไม่ดี

3. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation)

สมการพลังงานเป็นการลดรูปสมการมาจากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ที่สภาวะซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของของไหลเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความร้อนที่เพิ่มเข้าไปในส่วนของอนุภาคของของไหลบวกกับอัตราการทำงานของอนุภาคการไหล

อัตราการเพิ่มขึ้น ของพลังงานใน อนุภาคของการไหล	=	อัตราความร้อนสุทธิ กับอนุภาคของ ของไหล	+	อัตราการทำงานสุทธิ ของอนุภาค ของการไหล
------------------------------------------------------	---	----------------------------------------------	---	----------------------------------------------

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตร คือ

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (2.34)$$

พลังงานของของไหลถูกนิยามโดยผลรวมของพลังงานความร้อนภายใน i , พลังงานจลน์ $\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ และพลังงานศักย์โน้มถ่วง การนิยามนี้เกิดขึ้นในสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคของของไหลได้มีการเก็บพลังงานศักย์โน้มถ่วงไว้โดยค้ำไว้ถึงแรงโน้มถ่วงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของของไหลซึ่งทำให้เกิดงานขึ้นในอนุภาคของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านสนามโน้มถ่วง

กฎการอนุรักษ์พลังงานของอนุภาคของของไหลถูกรองรับโดยสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานอนุภาคของของไหลไปสู่ผลรวมของอัตราส่วนงานสุทธิที่ทำโดยอนุภาคของของไหลและความร้อนสุทธิที่ใส่เพิ่มเข้ามาในอนุภาคของของไหลและอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานจากแหล่งให้กำเนิด ดังนั้นสมการพลังงานคือ

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

$$\text{ในสมการที่ (2.35) } E = i + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \quad (2.35)$$

4. สมการนาเวียร์-สโตกส์สำหรับของไหลนิวตันเนียน (Navier Stokes equations for a Newtonian fluid)

การไหลของของไหลหลายๆชนิดค่าความเค้นหนืดถูกแสดงเป็นฟังก์ชันของอัตราการหดตัว เฉพาะที่ในการไหลใน 3 มิติ อัตราการหดตัวเฉพาะที่ของของไหลประกอบด้วย อัตราการหดตัวเชิงเส้นและอัตราการหดตัวเชิงปริมาตรโดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (2.36a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (2.36b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (2.36c)$$

ถ้าเราใช้แบบจำลองนิวตันเนียนสำหรับความเค้นหนืดในสมการพลังงานภายในจะสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \text{div } v + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i \quad (2.37)$$

ผลกระทบทั้งหมดเนื่องมาจากความเค้นหนืดในสมการพลังงานภายในจะถูกอธิบายโดยฟังก์ชันของการสูญเสีย Φ โดยสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda (\text{div } v)^2 \quad (2.38)$$

2.3 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ω SST (Shear Stress Transport)

แบบจำลอง Standard k- ω สร้างมาจากแบบจำลองพื้นฐานของแบบจำลอง Wilcox k- ω ข้อดีของแบบจำลองนี้คือมีความอ่อนไหว (Sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ K และ ω นอกชั้น Shear layer (Free stream layer) ดังนั้น จึงได้มีการปรับปรุงแบบจำลองและได้รวมเอาข้อเด่นหลายอย่างของแบบจำลองแบบ 2 สมการเข้าด้วยกัน โดยการให้น้ำหนัก (Weighting) ของค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองในแต่ละส่วนของการจำลองไม่เท่ากันและมีการกำหนดขีดจำกัดของการเกิด Eddy viscosity ของการไหลแบบ Strained flow ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แบบจำลองแบบแบ่งส่วนจะใช้แบบจำลอง k- ω ของ Wilcox ที่บริเวณใกล้ผนัง และใช้แบบจำลอง k- ϵ ที่ใกล้กับขอบของชั้นขีตผิวนวมไปถึงส่วนที่อยู่ในชั้นถัดออกไป

2.3.1 สมการ Turbulent kinetic energy (k) คือพลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยมวลของ Turbulent fluctuation คือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - D_k \quad (2.39)$$

2.3.2 สมการ Specific Dissipation Rate (ω) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \rho \frac{P_k}{\mu_t} - D_\omega + 2(1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (2.40)$$

$$P_k = \min \left[\mu_t S^2; 10 \rho \beta * k \omega \right], D_k = \rho \beta * k \omega, D_\omega = \beta \rho \omega^2 \quad (2.41)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left[\frac{2 \rho \sigma_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}; 10^{-20} \right] \quad (2.42)$$

ซึ่งมีค่า $CD_{k\omega}$ คือ cross-diffusion ในสมการ $k-\omega$ สำหรับค่าคงที่ของแบบจำลอง SST มีค่าดังนี้ $\alpha_1 = 0.31, k = 0.41, \beta^* = 0.09$ การปรับปรุงฟังก์ชันการคำนวณค่า Eddy viscosity เพื่อปรับปรุง การทำนายการไหลแบบแยกตัวด้วย Blending function ดังนี้

$$\mu_t = \min \left[\frac{\rho k}{\omega}; \frac{\alpha_1 \rho k}{SF_2} \right] \quad (2.43)$$

เมื่อ $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ คือ Strain rate และ $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ โดย

$$F_2 = \tanh \left\{ \left(\max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \right)^2 \right\} \quad (2.44)$$

สำหรับค่าฟังก์ชัน F_1 ถูกออกแบบมาเพื่อผสมค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของ $k-\varepsilon$ นิยามไว้ดังนี้

$$F_1 = \tanh \left\{ \left(\min \left[\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}; \frac{4\rho\sigma_{\omega_2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right] \right)^4 \right\} \quad (2.45)$$

ฟังก์ชันนี้จะมีค่าเป็น 1 ที่ผิว มีค่าเข้าใกล้ 1 ที่ชั้นขีดผิวและมีค่าเข้าสู่ 0 ที่ขอบของชั้นขีดผิว

2.4 ปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็ว (Pressure-velocity coupled)

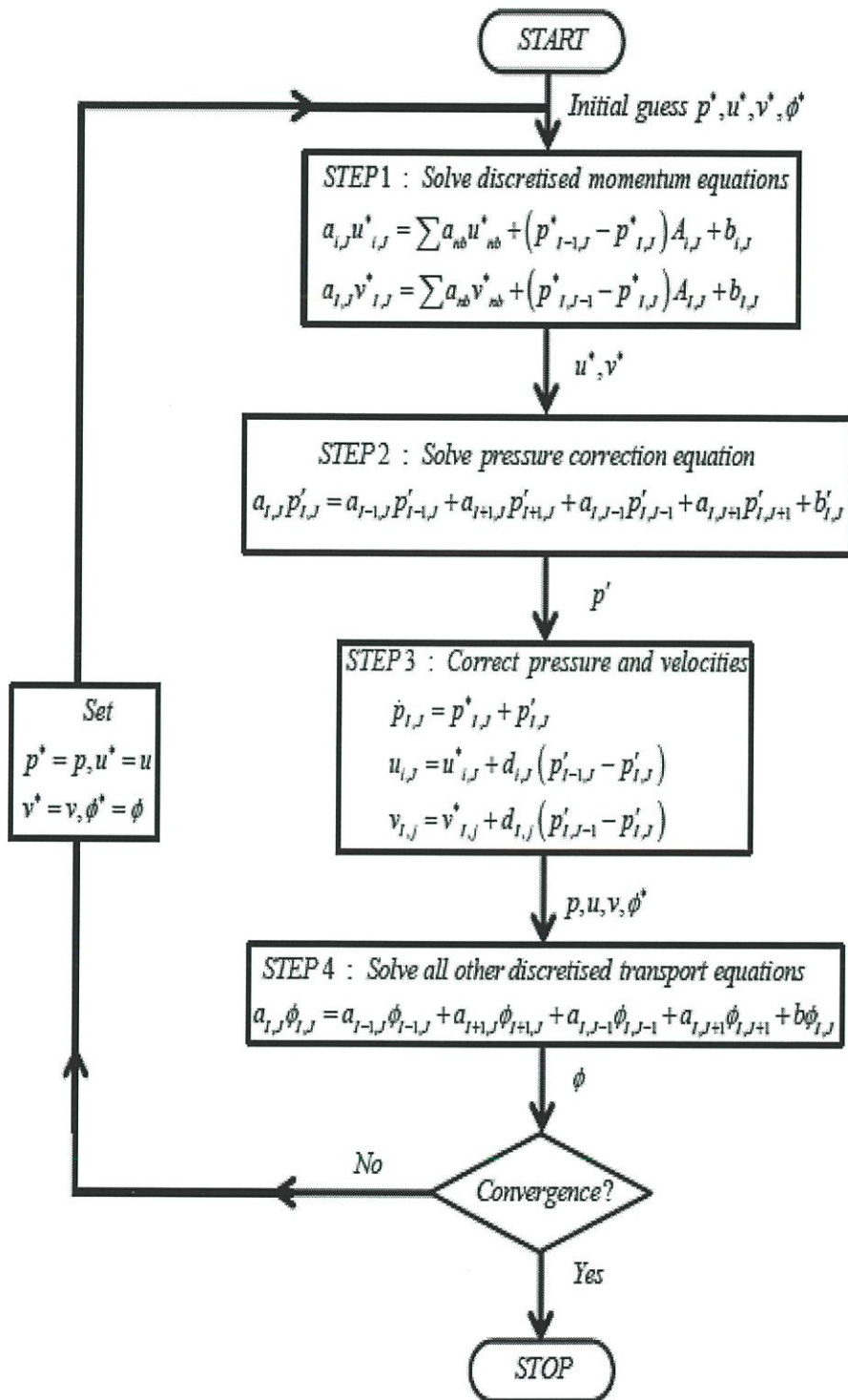
ในการศึกษานี้ใช้ปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็ว 2 ชนิด คือ PISO ในการคำนวณการศึกษาคุณลักษณะการไหลสองสถานะแต่ PISO มีลักษณะที่คล้ายกับ SIMPLE จึงควรรู้ถึงความต่างของปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็วทั้งสอง

2.4.1 SIMPLE

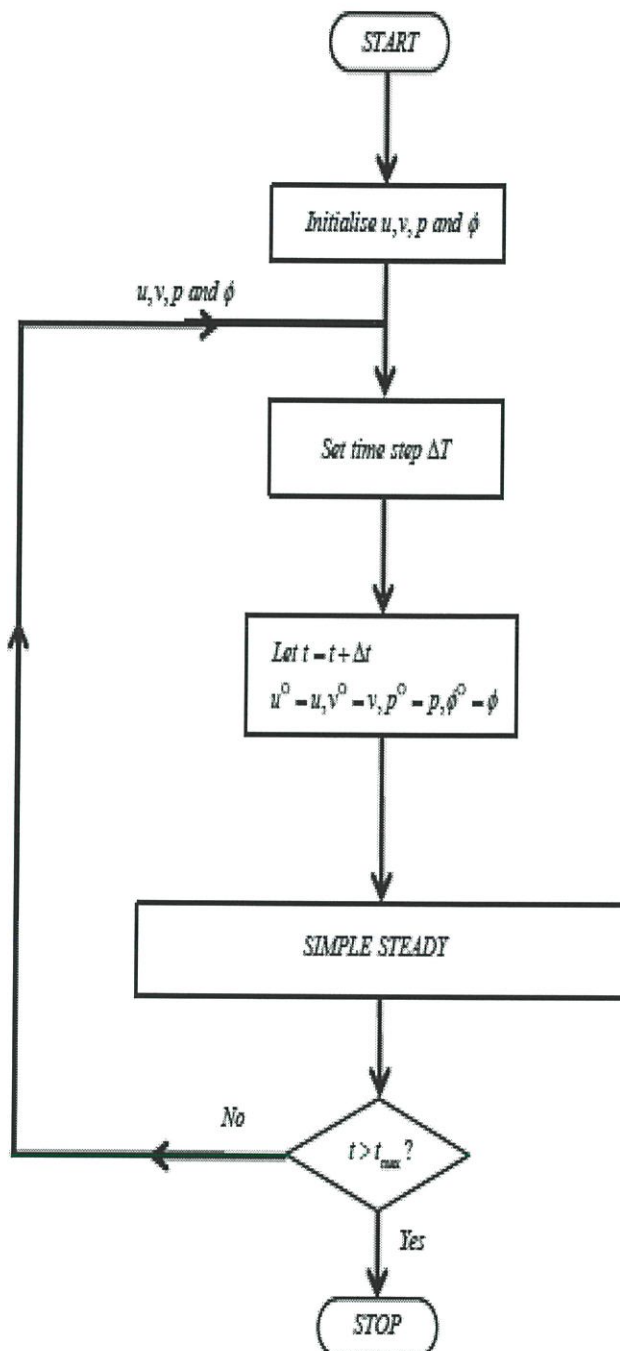
ย่อมาจาก Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation วิธีนี้จะเหมาะสำหรับการไหลแบบคงตัว จากรูปภาพที่ 2.6 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE โดยอธิบายได้ว่า ค่าตัวแปรถูกสมมติให้เป็นค่าเริ่มต้นค่าหนึ่งและแก้สมการโมเมนตัมเพื่อหาค่าความเร็ว นำค่าความเร็วที่แก้ได้ไปแก้สมการความดันเรียกค่าความดันที่แก้จากสมการนี้ว่า ความดันที่ถูกแก้ไข นำค่าความดันที่ถูกแก้ไขไปหาความเร็วด้วยสมการโมเมนตัมจะได้คำตอบเป็นความเร็วที่ถูกแก้ไขหลังจากนั้นนำค่าความดันแก้ไขและความเร็วแก้ไข นำไปแก้สมการอื่นๆเช่นสมการพลังงาน หรือสมการความปั่นป่วน แล้วจึงตรวจสอบการลู่เข้าของสมการ หากไม่ลู่เข้าจะนำค่าความดันและความเร็วที่ได้มาเป็นค่าตัวแปรสมมติและทำการหาคำตอบด้วยวิธีเดิม

2.4.2 PISO

ย่อมาจากคำว่า Pressure Implicit with Splitting Operator เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) ซึ่งถูกใช้ในการศึกษาของไหลสองสถานะ โดยมีลักษณะลำดับคล้ายปฏิสัมพันธ์ความเร็วแบบ SIMPLE แต่มีข้อแตกต่างกันก็คือ ปฏิสัมพันธ์ความเร็วแบบ PISO จะมีการแก้สมการให้ได้ความดันแก้ไขและความเร็วแก้ไขสองครั้ง ก่อนที่จะนำไปหาสมการอื่นโดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE



รูปที่ 2.7 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ PISO

บทที่ 3

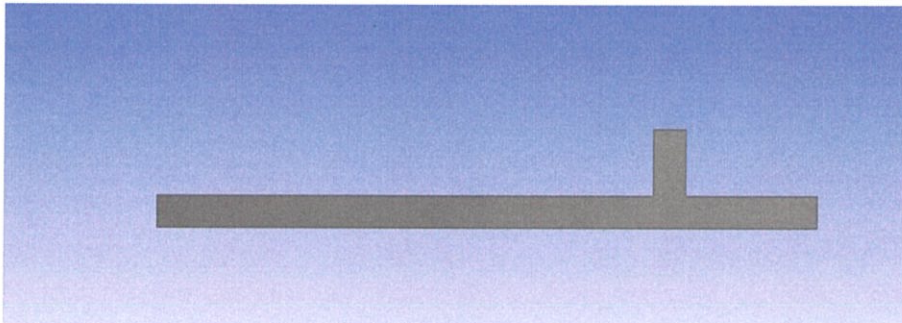
วิธีการดำเนินงาน

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) และขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid Independence) : Part I

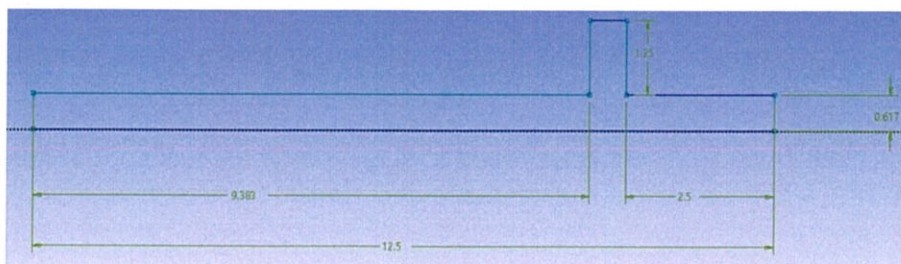
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว และของไหลสองสถานะภายในท่อรูปสี่เหลี่ยมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS Fluent เป็นโปรแกรมในการศึกษา

3.1.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาความถูกต้องและขนาดกริดที่เหมาะสมคือ T-junction โดยน้ำไหลเข้าด้านข้างและไนโตรเจนไหลเข้าทางด้านบน นอกจากนี้ของไหลมีลักษณะการไหลจากทางด้านขวาไปด้านซ้าย ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



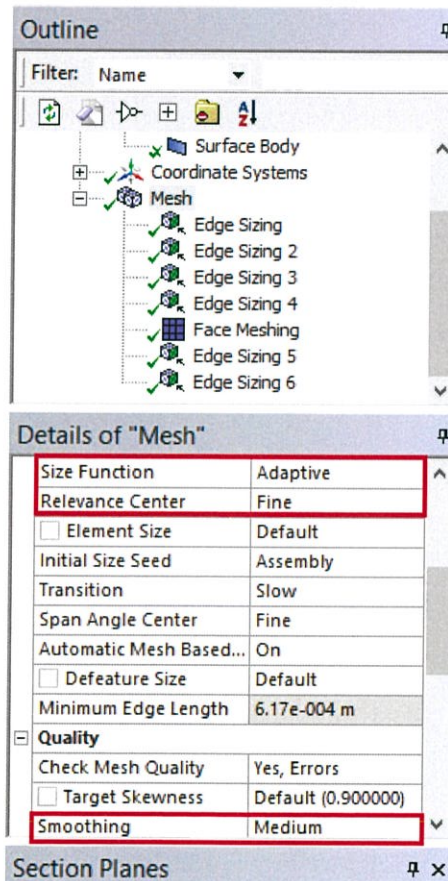
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลอง 2 มิติ T-junction



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดของแบบจำลอง 2 มิติ T-junction มีหน่วยเป็น mm.

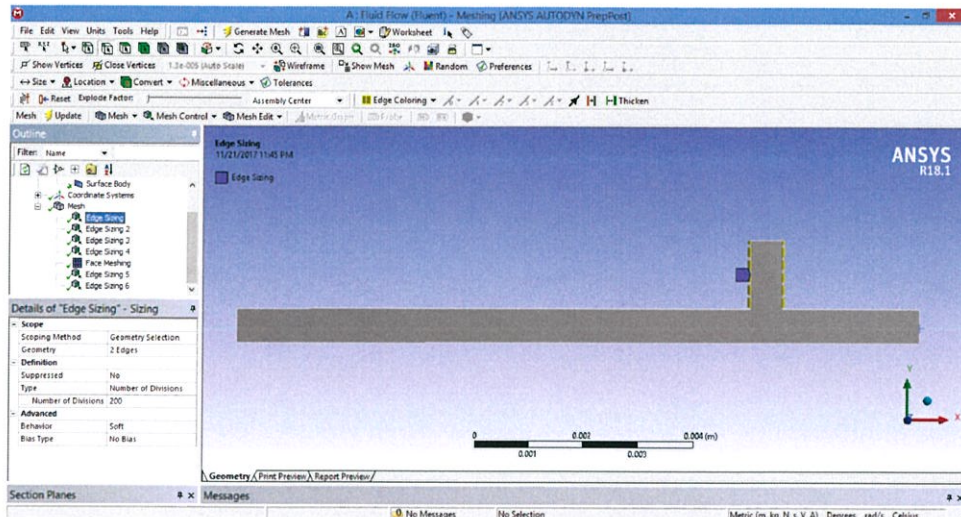
3.1.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)

แบ่งแบบจำลองที่สร้างออกเป็นชิ้นเล็กๆโดยเลือกใช้รูปทรงสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) และกำหนดขนาดกริดสุทธิไว้ได้แก่ 28,000, 61,000, 140,000 และ 200,000 เพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid Independence) ในการคำนวณซึ่งจะช่วยลดเวลาในการหาคำตอบ ที่หัวข้อ Sizing กำหนด Size function เป็น Adaptive, Relevance Center เป็น Fine ดังรูปที่ 3.3



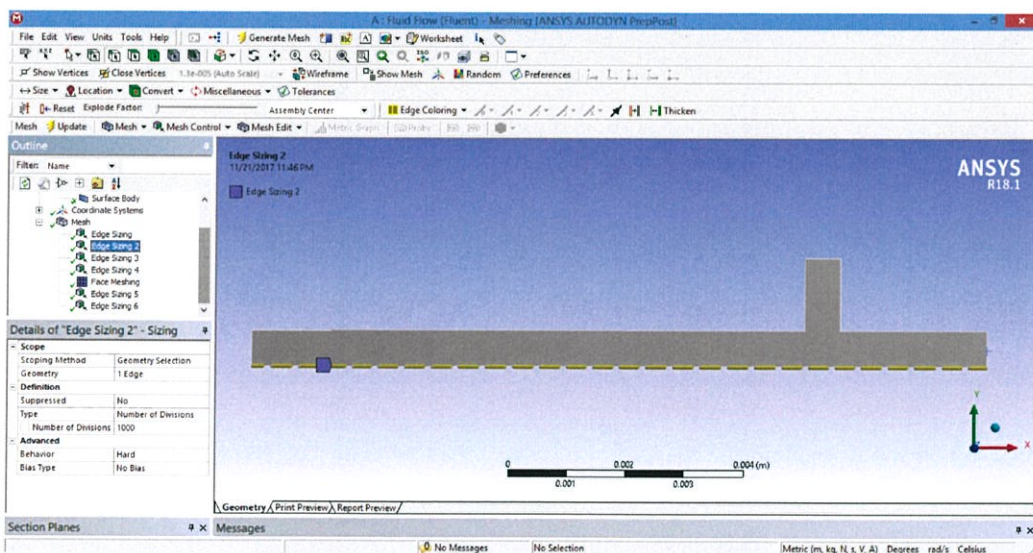
รูปที่ 3.3 แสดงการตั้งค่ารายละเอียดของกริด

หลังจากนั้นทำการแบ่งกริดที่เส้นขอบแต่ละเส้นของแบบจำลองด้วย Edge Sizing โดยเริ่มจากเส้นขอบแนวตั้งของทางเข้าไนโตรเจนก่อน หลังจากนั้นปรับ Type เป็น Number of Division และใช้จำนวน Number of Division เป็น 200, โดยที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Soft ดังรูปที่ 3.4



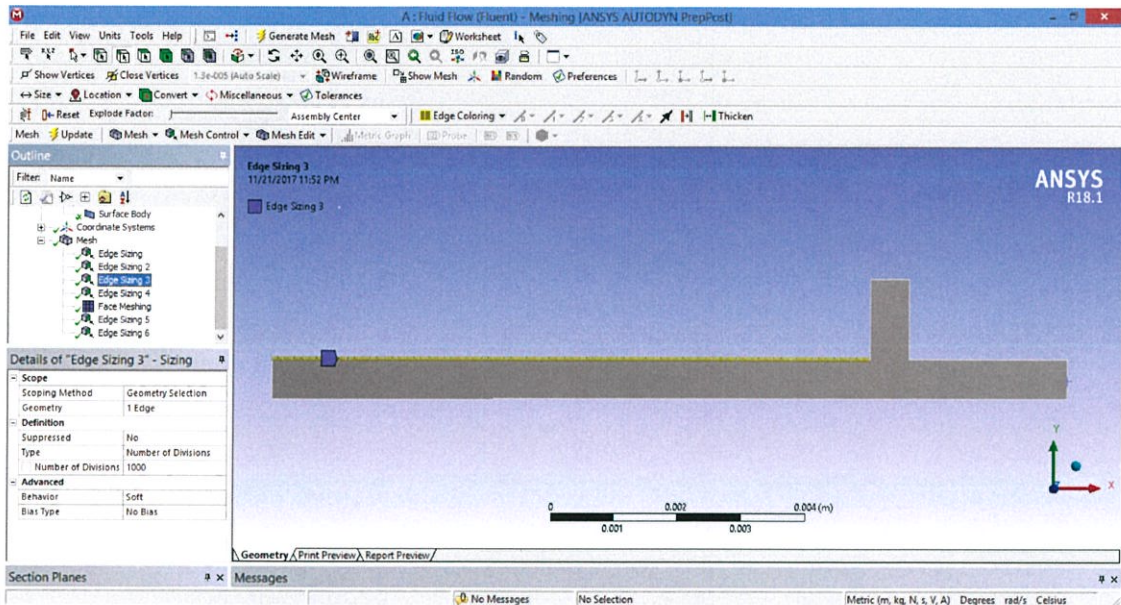
รูปที่ 3.4 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 1

Edge Sizing เส้นที่ 2 จะกำหนดคล้ายกับ Edge Sizing เส้นแรกเพียงแต่ปรับ Number of Division เป็น 1000 และที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Hard ดังรูปที่ 3.5



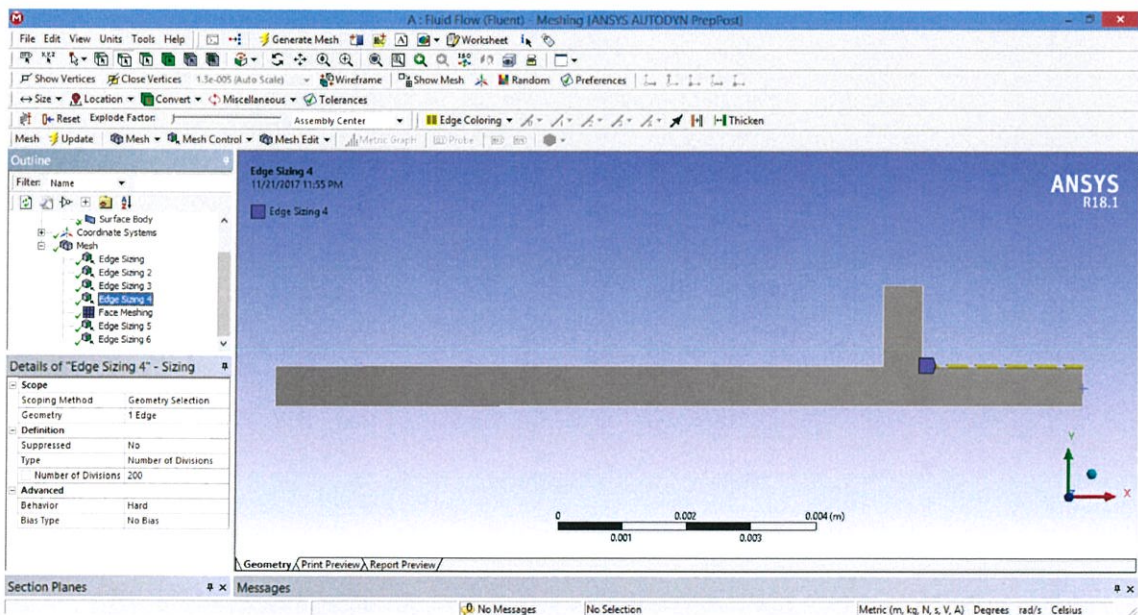
รูปที่ 3.5 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 2

Edge Sizing เส้นที่ 3 จะกำหนดคล้ายกับ Edge Sizing เส้นแรกเพียงแต่ปรับ Number of Division เป็น 1000 และที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Soft ดังรูปที่ 3.6



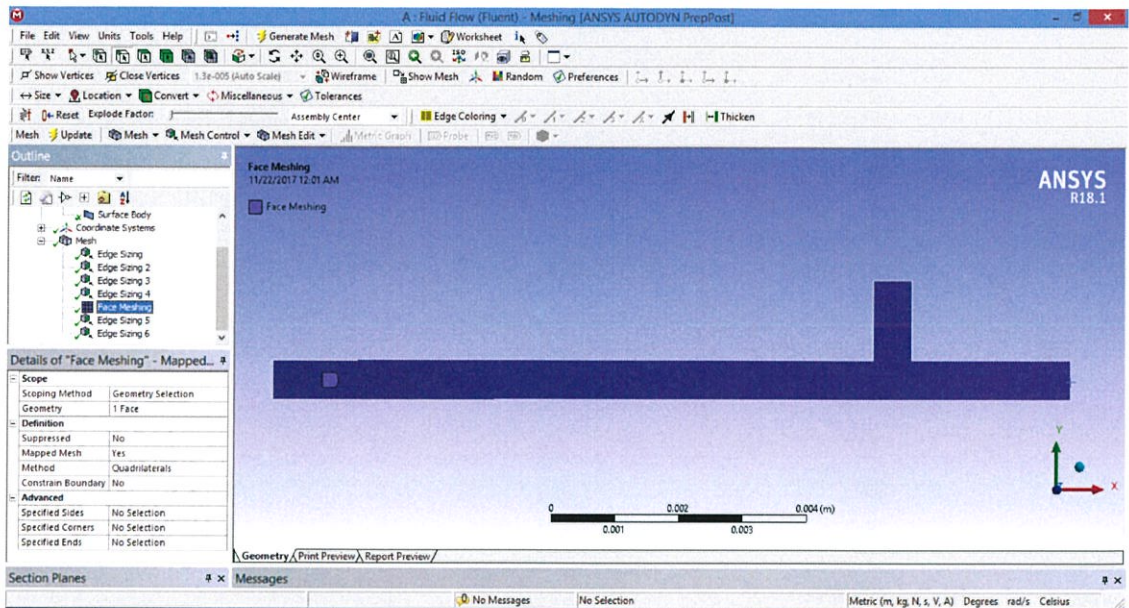
รูปที่ 3.6 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 3

Edge Sizing เส้นที่ 4 จะกำหนดคล้ายกับ Edge Sizing เส้นแรกเพียงแต่ปรับ Number of Division เป็น 1000 และที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Hard ดังรูปที่ 3.7



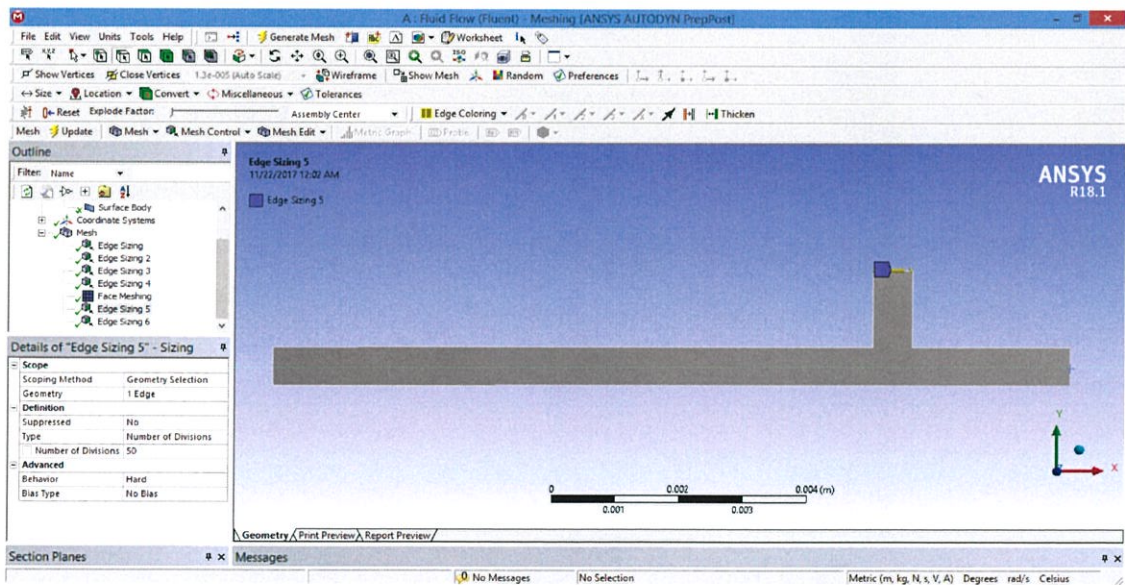
รูปที่ 3.7 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 4

หลังจากกำหนดขอบ Edge Sizing ไป 4 ขอบแล้ว ใช้ Face Meshing เพื่อปรับให้กริดทั้งหมดในแบบจำลองเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Quadrilaterals) ดังรูปที่ 3.8



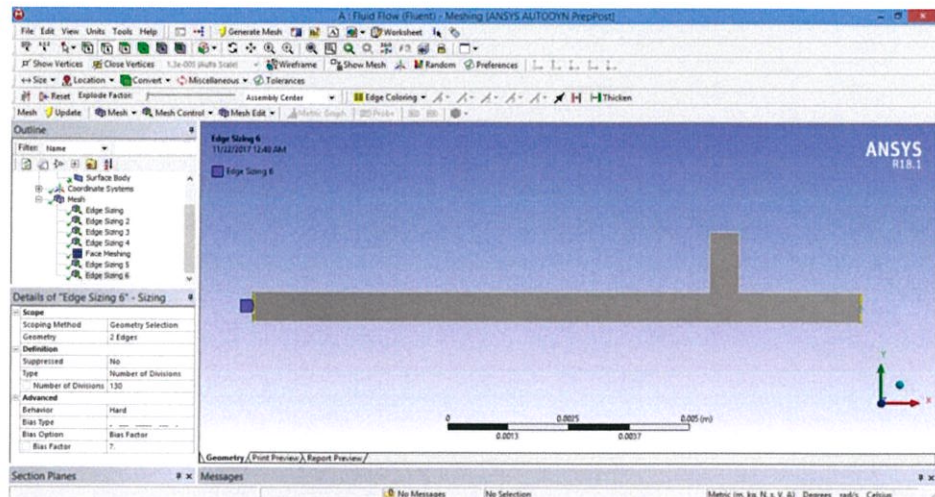
รูปที่ 3.8 แสดงการตั้งค่า Face Meshing

Edge Sizing เส้นที่ 5 จะกำหนดคล้ายๆกับ Edge Sizing เส้นแรกเพียงแต่ปรับ Number of Division เป็น 50 และที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Hard ดังรูปที่ 3.9



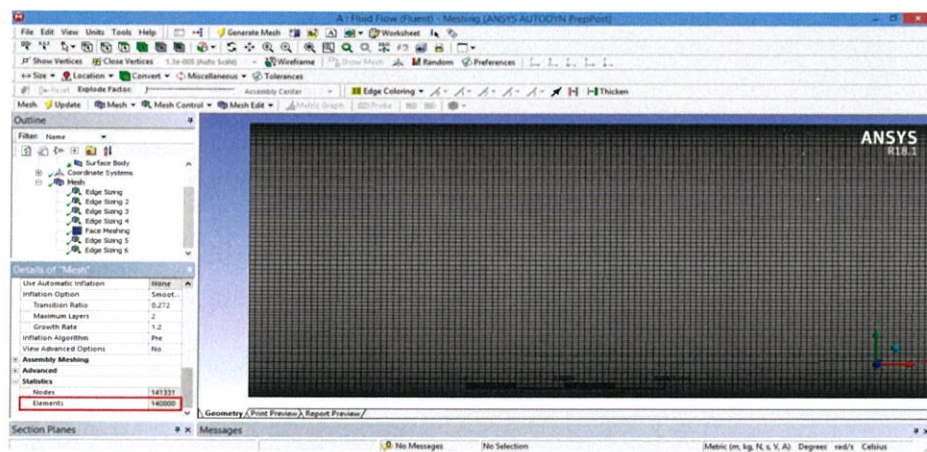
รูปที่ 3.9 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 5

Edge Sizing เส้นที่ 6 จะกำหนดคล้ายๆกับ Edge Sizing เส้นแรกเพียงแต่ปรับ Number of Division เป็น 130 ซึ่งส่วนของ Number of Division ที่เส้นขอบที่ 6 นี้มีผลต่อกริดสุทธิที่กล่าวมาก่อนหน้าและที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Hard หลังจากนั้นที่ Bias Type เลือกแบบ 3, Bias Option : Bias Factor โดยมีค่า Bias Factor 7 ซึ่งค่า Bias Factor นี้จะทำให้ตรงผนังของแบบจำลองมีความละเอียดมากกว่าที่จุดศูนย์กลางของแบบจำลอง โดยแสดงดังรูปที่ 3.10



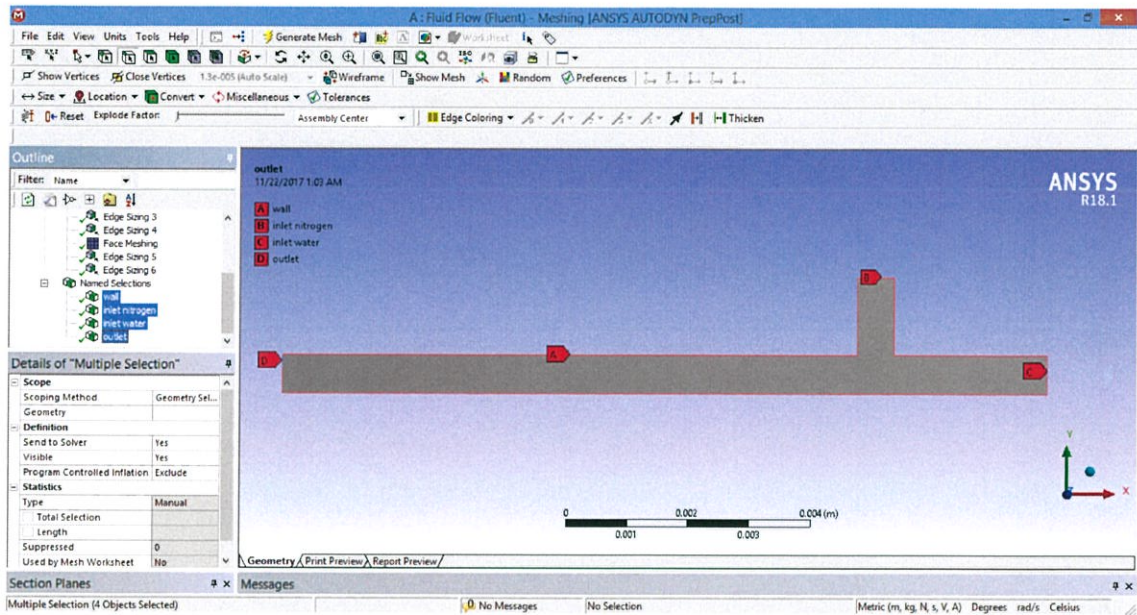
รูปที่ 3.10 แสดงการตั้งค่า Edge Sizing เส้นที่ 6

เมื่อสร้าง Edge Sizing และ Face Meshing เรียบร้อยแล้ว กริดสุทธิทั้งหมดที่ได้ คือ 140,000 โดยจะพบที่บริเวณผนังมีกริดที่ละเอียดกว่าบริเวณจุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 3.11 ส่วนที่กริดสุทธิขนาดอื่นจะได้จากการเปลี่ยนแปลงค่า Number of Division ของ Edge Sizing



รูปที่ 3.11 แสดงกริดสุทธิจำนวน 140,000

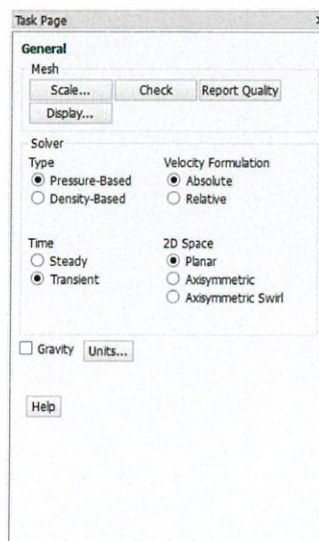
หลังจากได้จำนวนกริดสุทธิแล้วทำการเลือกเส้นขอบในแบบจำลองแล้วตั้งชื่อให้เส้นขอบที่เลือกไว้เช่น Wall, Inlet water, Inlet nitrogen, Outlet ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงการตั้งชื่อเส้นขอบ

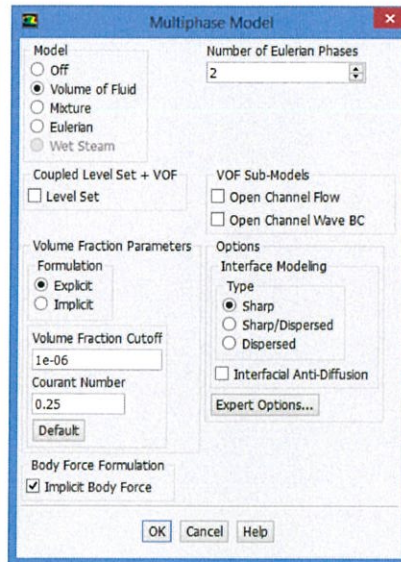
3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)

การตั้งค่าที่ General เลือก Time : Transient และไม่คำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วง ส่วนคำสั่งอื่นที่อยู่ใน General ให้ใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.13



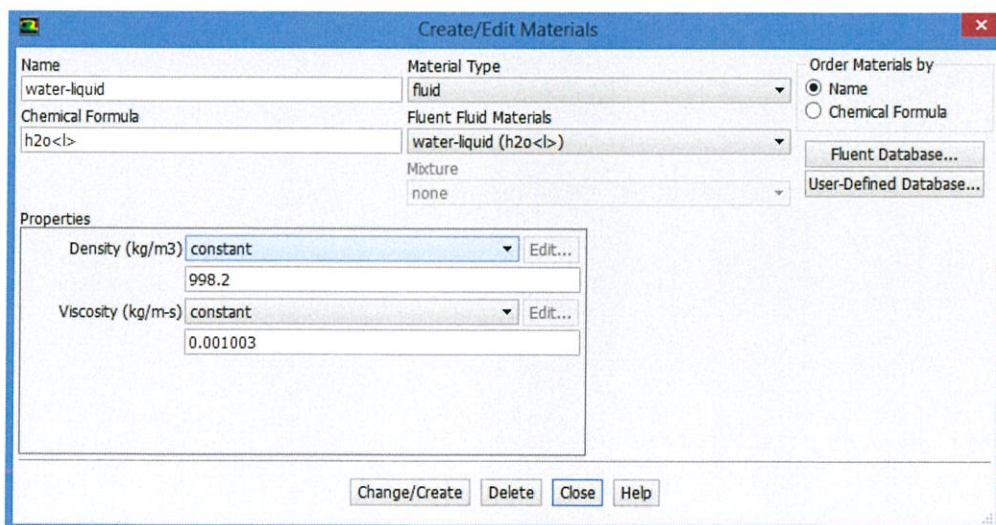
รูปที่ 3.13 แสดงการตั้งค่าที่ General

การตั้งค่าที่ Models เลือกที่ Multiphase จากนั้นเลือกที่ Volume of Fluid จะมีหน้าต่างเพิ่มขึ้นมาให้ตั้งค่า โดยที่ Body Force Formulation เลือก Implicit Body Force ส่วนคำสั่งอื่นในหน้าต่างให้ใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.14

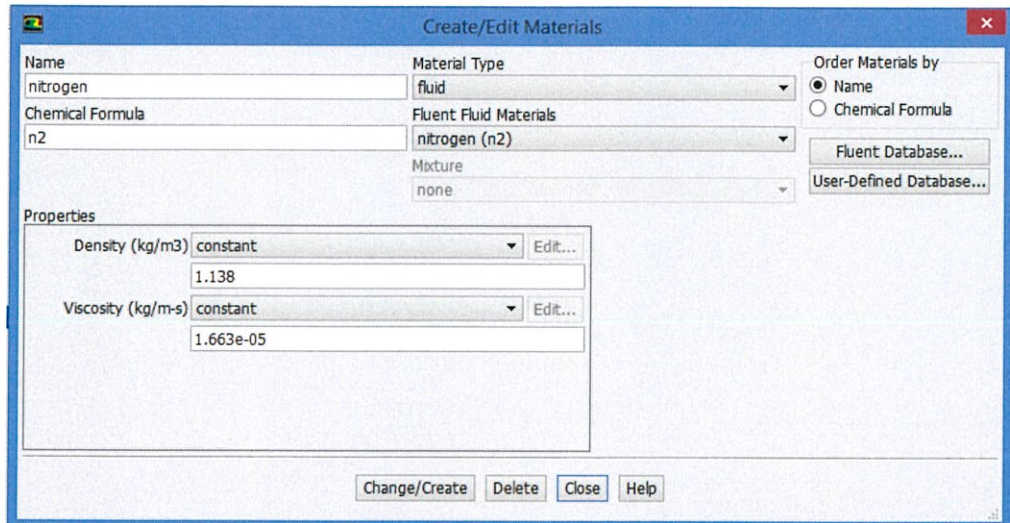


รูปที่ 3.14 แสดงการตั้งค่าที่ Model

การตั้งค่าที่ Materials ทำการเพิ่มน้ำในสถานะของเหลวและไนโตรเจนสถานะแก๊สโดยมีค่าความหนาแน่น (Density) และค่าความหนืด (Viscosity) ดังรูป 3.15 และ 3.16

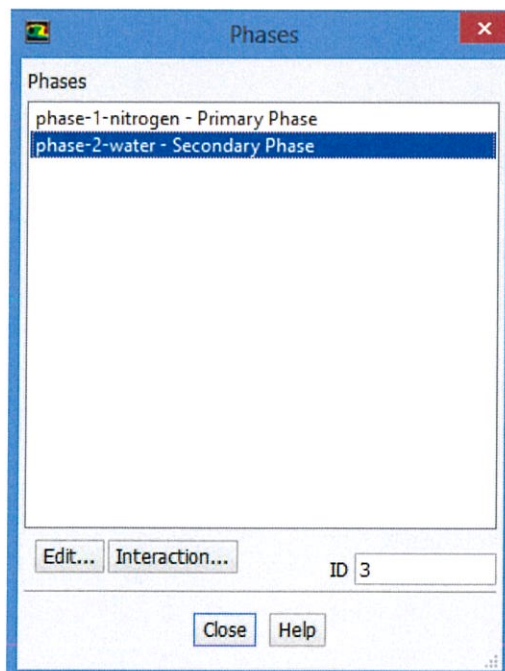


รูปที่ 3.15 แสดงการตั้งค่าคุณสมบัติของน้ำ



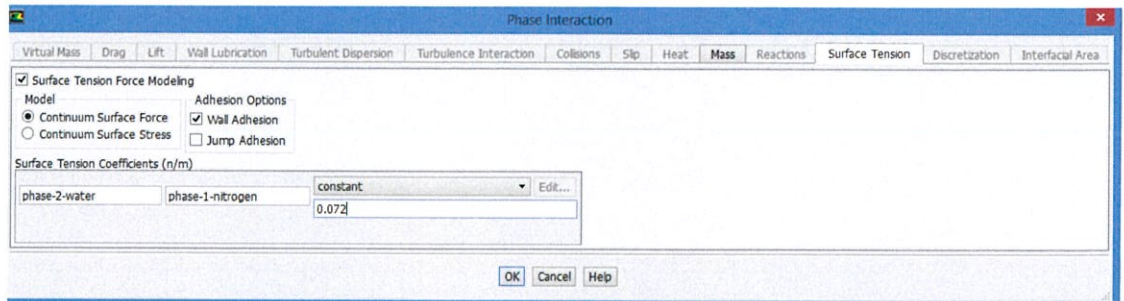
รูปที่ 3.16 แสดงการตั้งค่าคุณสมบัติของไนโตรเจน

การตั้งค่า Phase ทำได้โดยการกำหนดให้สถานะแรกเป็นไนโตรเจนและสถานะที่สองเป็นน้ำ
ดังรูปที่ 3.17



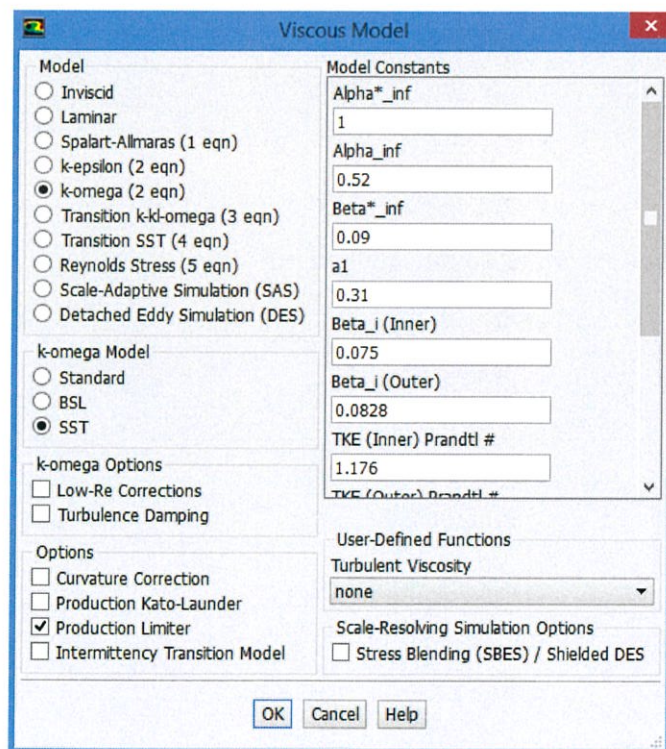
รูปที่ 3.17 แสดงการตั้งค่าลำดับของแต่ละสถานะ

การตั้งค่า Phase Interaction ระหว่างสองสถานะนั้นที่ Adhesion Options ใช้ Wall Adhesion โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวระหว่างสองสถานะมีค่า 0.072 N/m เป็นค่าที่อ้างอิงจากการคำนวณเชิงตัวเลขของ Padoin et al. (2016) ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการตั้งค่าความสัมพันธ์ระหว่างสถานะ

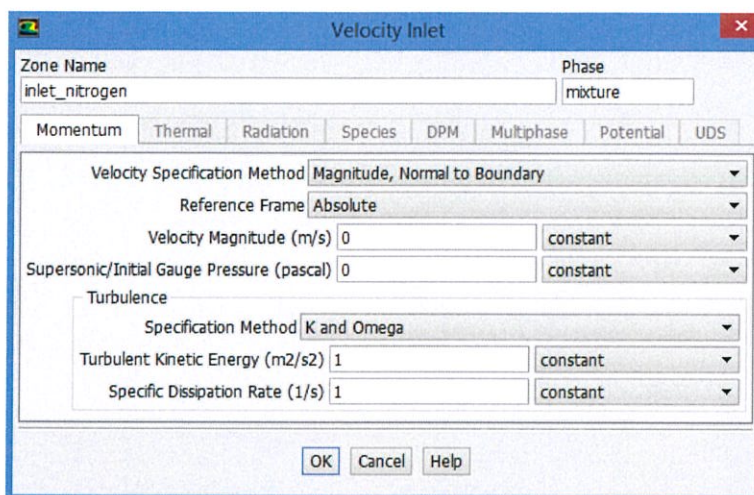
การตั้งค่าแบบจำลอง Viscous นั้นใช้แบบจำลอง k-omega โดยเป็นแบบจำลอง SST k-omega ส่วนคำสั่งอื่นในหน้าต่างให้ใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.19



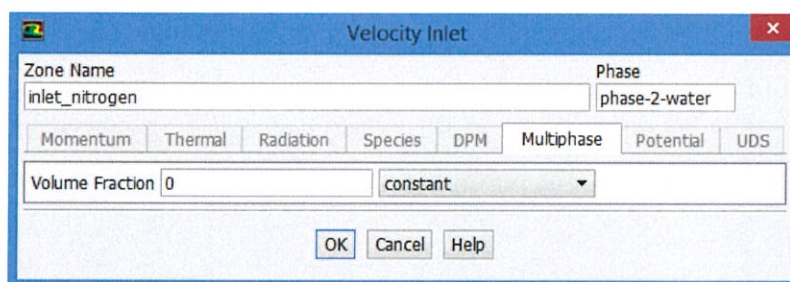
รูปที่ 3.19 แสดงการตั้งค่า Viscous

การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่ทางเข้าของส่วนที่เป็นสถานะผสม กำหนดความเร็วของไนโตรเจนจาก Velocity Magnitude, กำหนดให้ ความดันเกจเป็น 0 Pa กำหนดค่าของ Turbulent Kinetic Energy และ Specific Dissipation Rate เป็น 1 นอกจากนั้นที่

ทางเข้าของไนโตรเจนมีการกำหนดสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของสถานะน้ำ เป็น 0 ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21

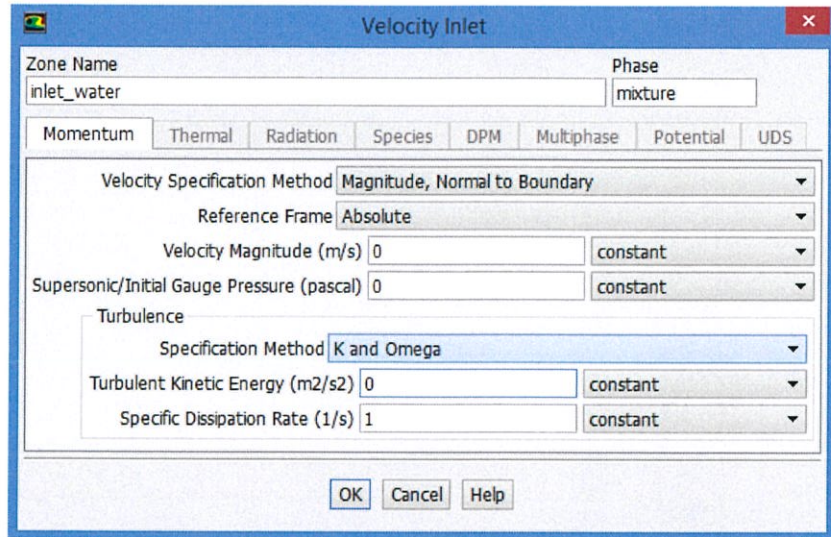


รูปที่ 3.20 แสดงการกำหนดความเร็ว, ความดันของและรูปแบบความปั่นป่วนของไนโตรเจน

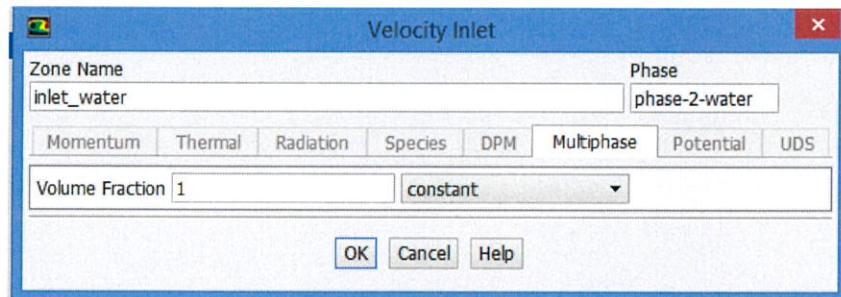


รูปที่ 3.21 แสดงการกำหนดสัดส่วนปริมาตรของสถานะน้ำที่ทางเข้าของไนโตรเจน

ที่ทางเข้าของส่วนที่เป็นสถานะผสม กำหนดความเร็วของน้ำจาก Velocity Magnitude, กำหนดให้ความดันเกจเป็น 0 Pa กำหนดค่าของ Turbulent Kinetic Energy และ Specific Dissipation Rate เป็น 0 และ 1 ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ทางเข้าของน้ำมีการกำหนดสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของสถานะน้ำ เป็น 1 ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23

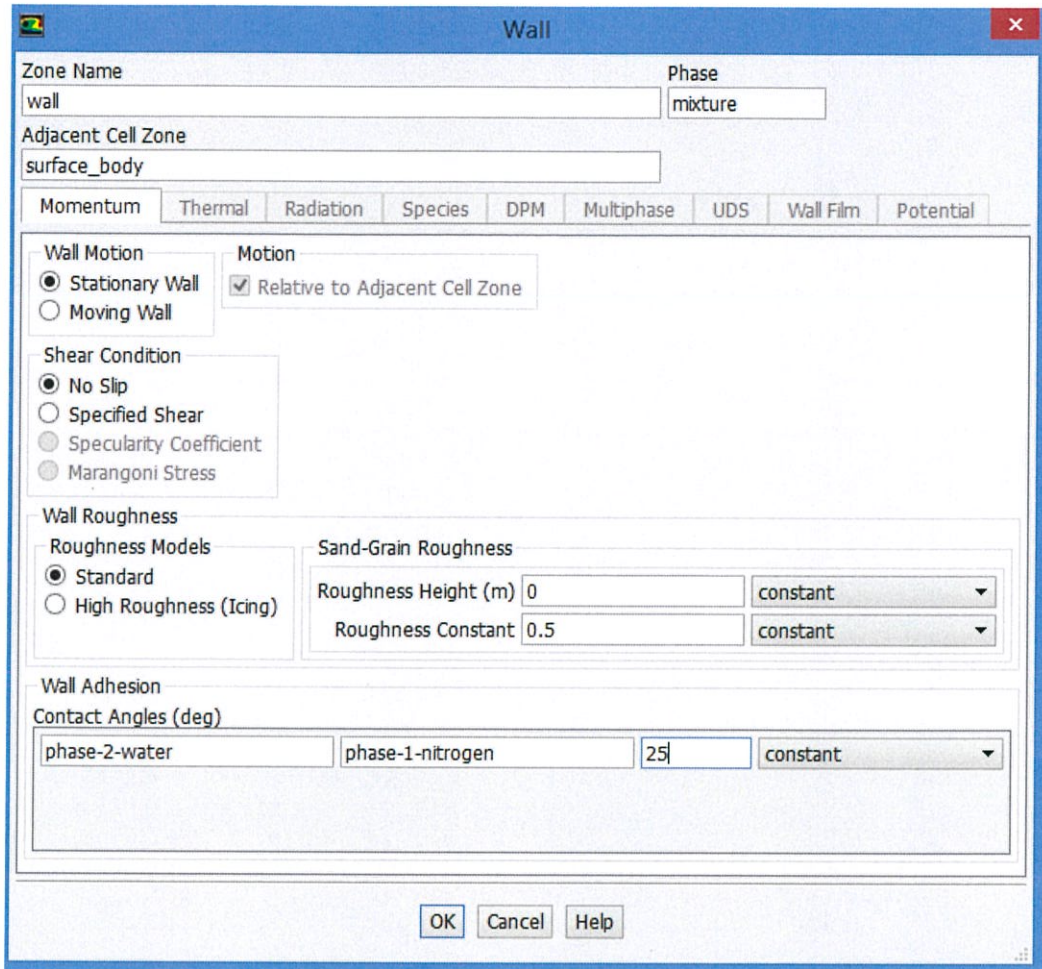


รูปที่ 3.22 แสดงการกำหนดความเร็ว, ความดันของและรูปแบบความปั่นป่วนของน้ำ



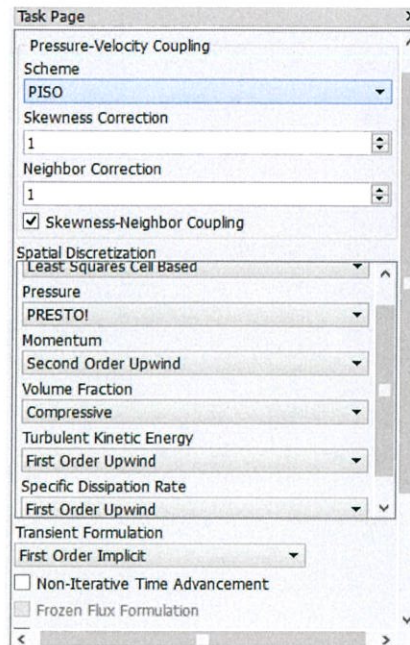
รูปที่ 3.23 แสดงการกำหนดสัดส่วนปริมาตรของสถานะน้ำที่ทางเข้าของน้ำ

การตั้งเงื่อนไขขอบเขตบริเวณผนัง ที่ Wall Adhesion กำหนดมุมสัมผัสระหว่างสองสถานะ คือ น้ำและไนโตรเจนมีค่า 25° โดยเป็นค่าที่อ้างอิงจากการคำนวณเชิงตัวเลขของ Padoin et al. (2016)

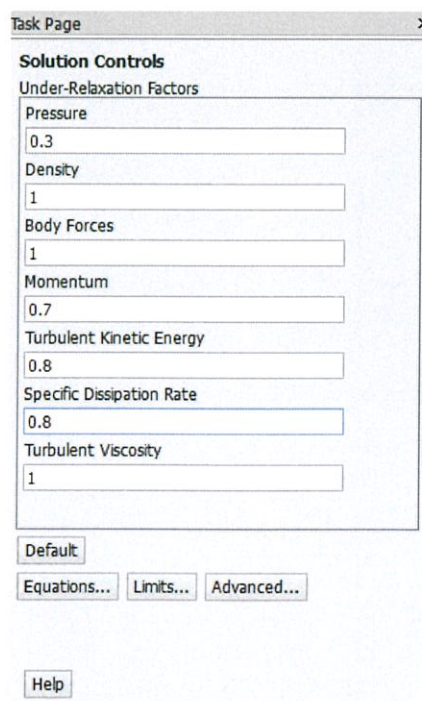


รูปที่ 3.24 แสดงการตั้งค่ามุมสัมผัสผิวระหว่างสถานะน้ำและไนโตรเจน

การตั้งค่าสำหรับคำนวณคำตอบ จากแบบจำลองที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ในสถานะขึ้นอยู่กับเวลา (Transient) เลือกวิธีการคำนวณผลแบบ PISO นอกจากนั้นที่ Volume Fraction ใช้เป็น Compressive ส่วนคำสั่งอื่นในหน้าต่างให้ใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.25 และ 3.26

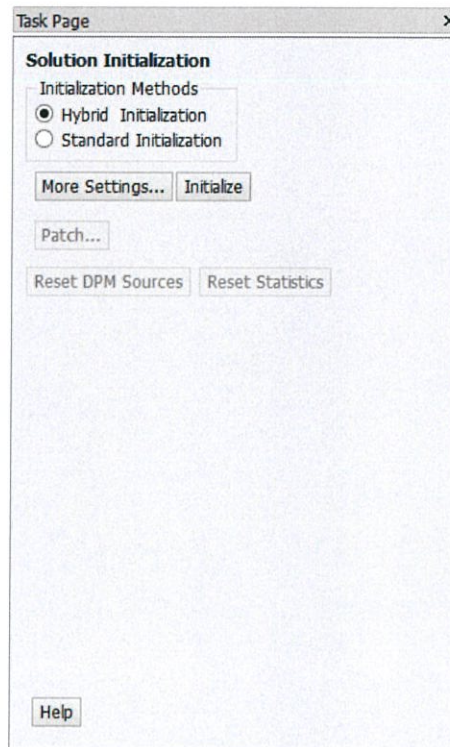


รูปที่ 3.25 แสดงการตั้งเงื่อนไขวิธีการแก้หาคำตอบ

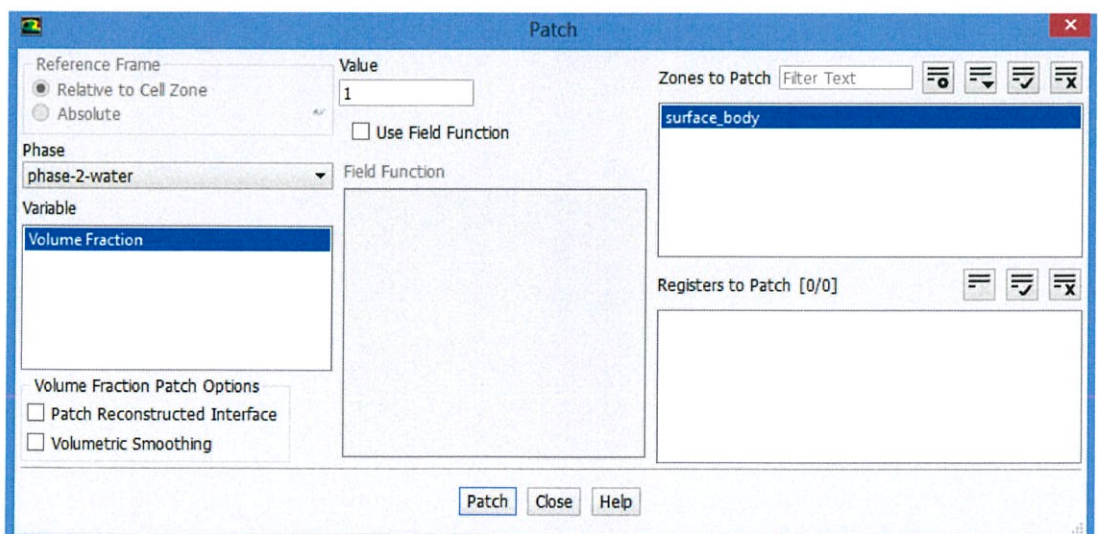


รูปที่ 3.26 แสดงค่าปัจจัยที่ช่วยในการแก้หาคำตอบ

การตั้งค่า Solution Initialization คือการสมมุติค่าตอบก่อนการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบโดยใช้วิธีแบบ Hybrid Initialization และเพื่อที่จะไม่ให้มีน้ำเกิดขึ้นทั้งหมดในการไหลของท่อหลักจึงมีการใช้เทคนิค Patching โดยกำหนดขอบเขตเป็นแบบจำลองทั้งหมด สถานะเป็นน้ำและมีค่า Volume Fraction เท่ากับ 1 ดังรูปที่ 3.27 และ 3.28

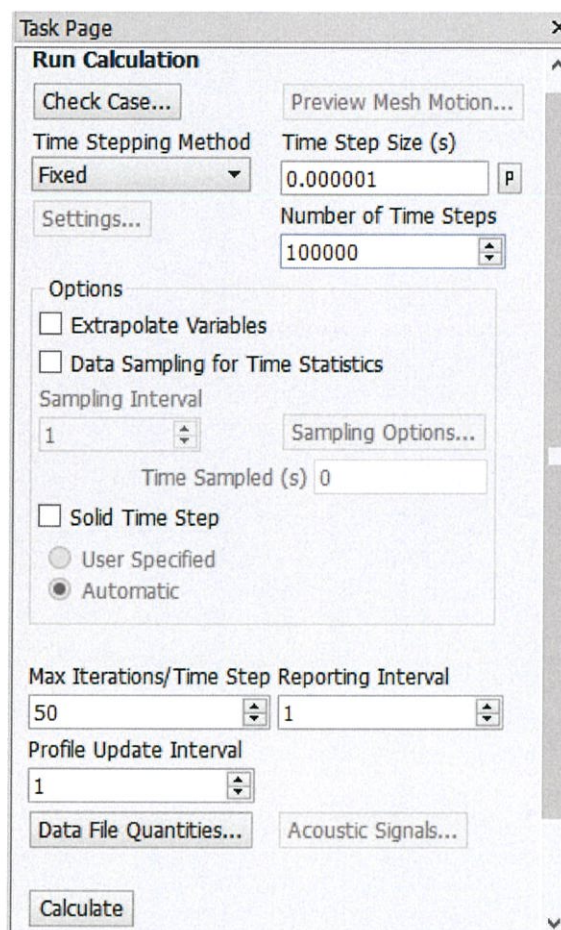


รูปที่ 3.27 แสดงการสมมุติค่าตอบก่อนการคำนวณเชิงตัวเลข



รูปที่ 3.28 แสดงการใช้เทคนิค patching

การตั้งค่าในส่วนของการคำนวณ Run calculation นั้นกำหนด Time step size เป็น 10^{-6} s จำนวนของ Time steps เป็น 100,000 และกำหนดการทำซ้ำสูงสุดเป็น 50 ครั้ง/Timestep ดังรูปที่ 3.29

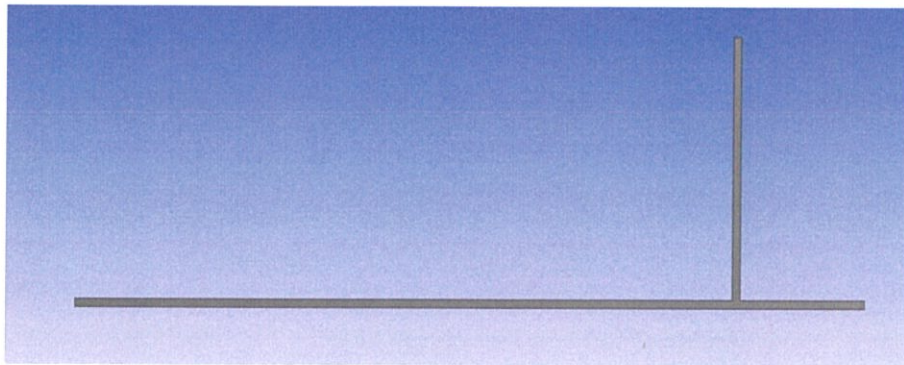


รูปที่ 3.29 แสดงการตั้งค่าในส่วนของการคำนวณที่ใช้ในการคำนวณการไหลสองสถานะ

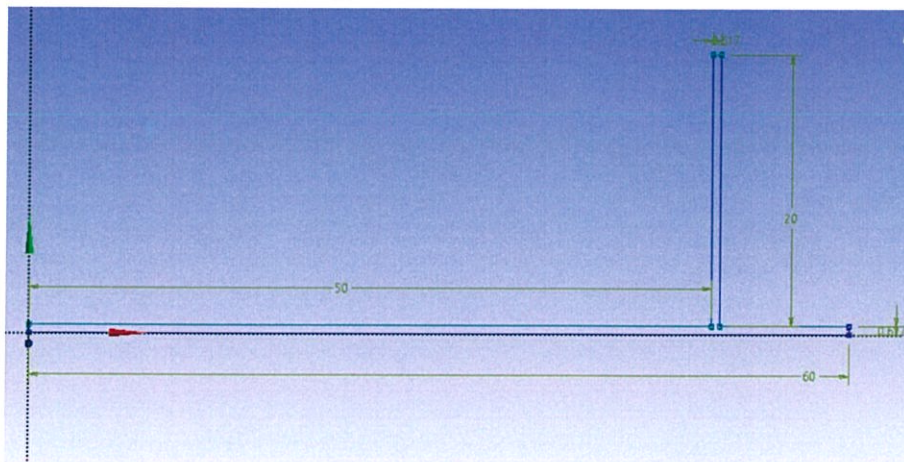
3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) และขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid Independence) : Part II

3.2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและขนาดกริดที่เหมาะสมในส่วนที่ 1 นั้นเป็นการลดขนาดแบบจำลองลงมาตามงานวิจัยของ Padoin et al. (2016) ซึ่งอาจจะทำให้ผลการตรวจสอบคลาดเคลื่อนได้จึงได้ใช้แบบจำลองของ Choi et al. (2011) ซึ่งเป็นขนาดตามการทดลอง โดยแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาความถูกต้องและขนาดกริดที่เหมาะสมคือ T-junction โดยน้ำไหลเข้าด้านข้างและไนโตรเจนไหลเข้าทางด้านบน นอกจากนี้ของไหลมีลักษณะการไหลจากทางด้านขวาไปด้านซ้าย ดังรูปที่ 3.30 และ 3.31



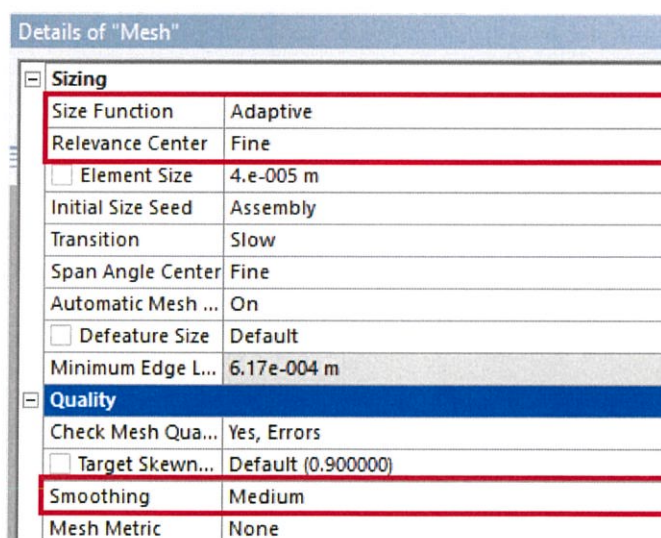
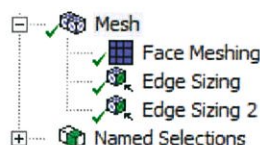
รูปที่ 3.30 แสดงแบบจำลองในโปรแกรม Design Modeler



รูปที่ 3.31 แสดงขนาดของแบบจำลอง

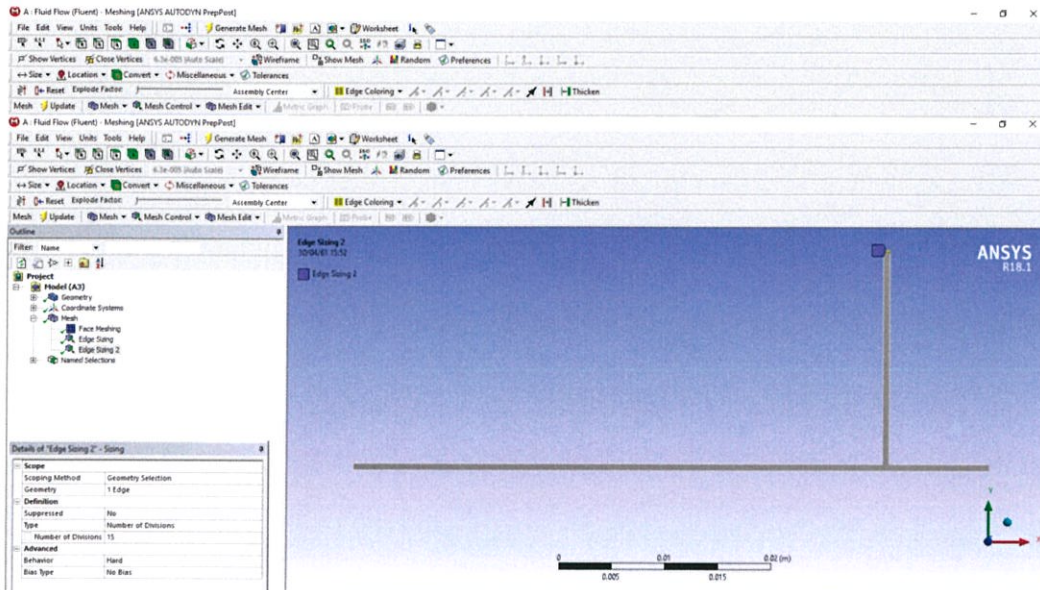
3.2.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)

แบ่งแบบจำลองที่สร้างออกเป็นชิ้นเล็กๆโดยเลือกใช้รูปทรงสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) และกำหนดขนาดกริดสุทธิไว้ได้แก่ 26,006, 80,004, 105,000 และ 150,000 เพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid Independence) ในการคำนวณซึ่งจะช่วยลดเวลาในการหาคำตอบที่หัวข้อ Sizing กำหนด Size function เป็น Adaptive, Relevance Center เป็น Fine, กำหนด Element size เป็น 0.00004 และ smoothing เป็น Medium ดังรูปที่ 3.32



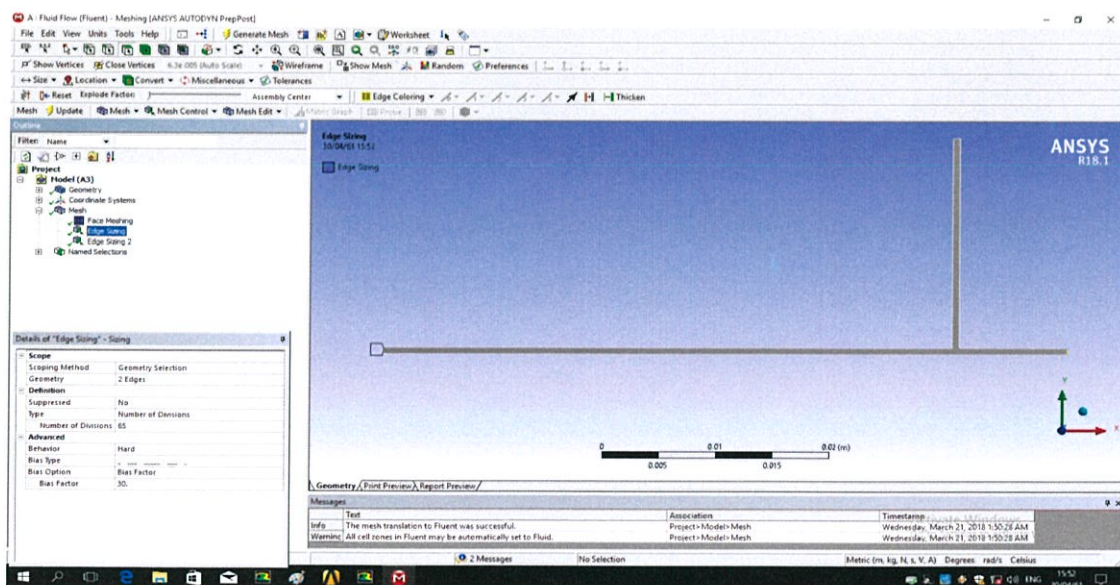
รูปที่ 3.32 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing

หลังจากนั้นทำการแบ่งกริดที่เส้นขอบของแบบจำลองด้วย Edge Sizing โดยเริ่มจากเส้นขอบของทางเข้าไนโตรเจนก่อน หลังจากนั้นปรับ Type เป็น Number of Division และใช้จำนวน Number of Division เป็น 15, โดยที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Hard ดังรูปที่ 3.33



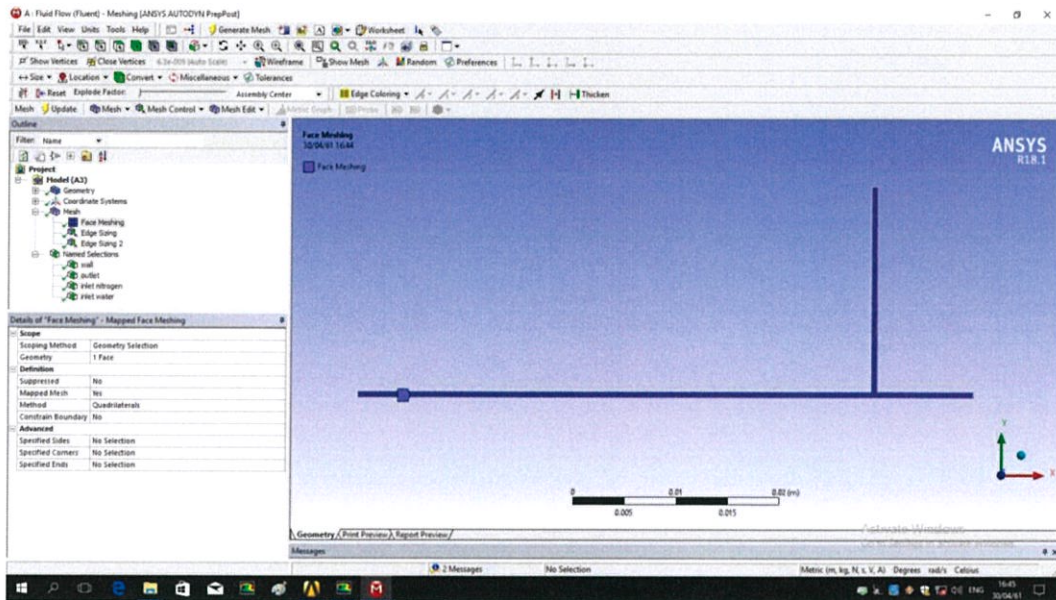
รูปที่ 3.33 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing

ต่อไปกำหนด Edge Sizing ที่เส้นขอบทางเข้าและทางออกของน้ำหลังจากนั้นปรับ Type เป็น Number of Division และใช้จำนวน Number of Division เป็น 65, โดยที่ส่วนของ Advanced : Behavior เลือกเป็น Hard หลังจากนั้นที่ Bias Type เลือกรูปแบบ 3, Bias Option : Bias Factor โดยมีค่า Bias Factor 30 ซึ่งค่า Bias Factor นี้จะทำให้ตรงผนังของแบบจำลองมีความละเอียดมากกว่าที่จุดศูนย์กลางของแบบจำลอง ดังรูปที่ 3.34



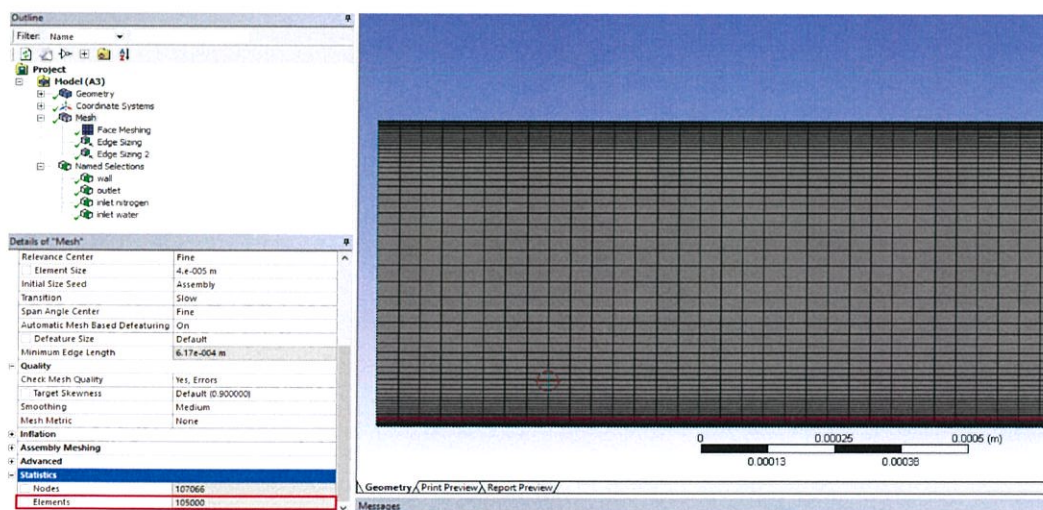
รูปที่ 3.34 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing

หลังจากนั้นใช้ Face Meshing ทั้งพื้นผิวของแบบจำลองเพื่อปรับให้รูปแบบของกริดเป็นแบบ Quadrilaterals ดังรูปที่ 3.35



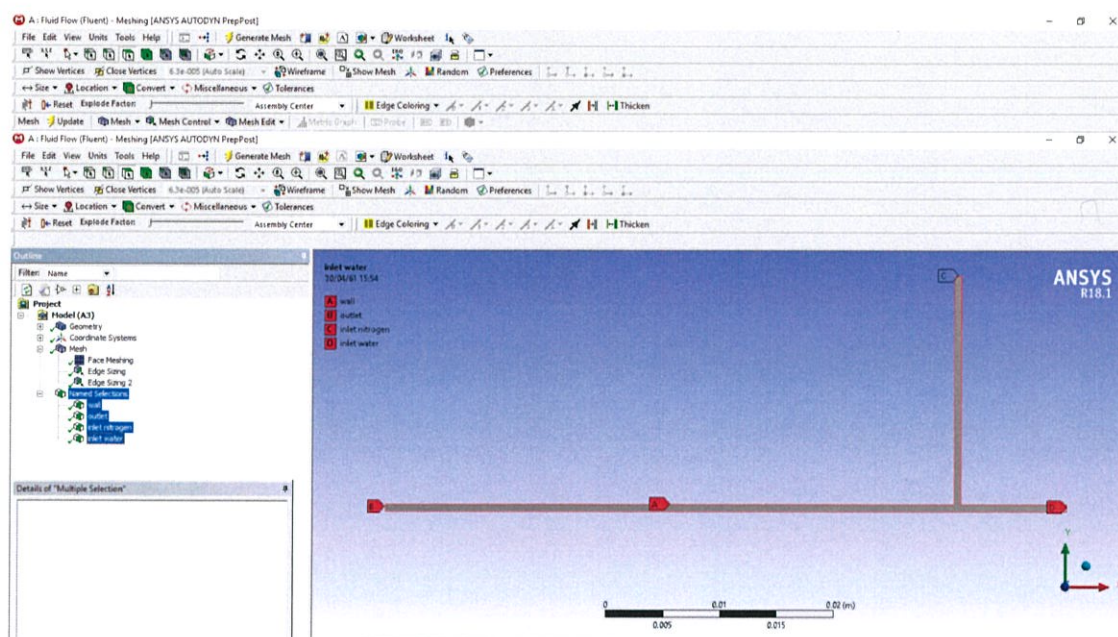
รูปที่ 3.35 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing

เมื่อสร้าง Edge Sizing และ Face Meshing เรียบร้อยแล้ว กริดสุทธิทั้งหมดที่ได้คือ 105,000 โดยจะพบที่บริเวณผนังมีกริดที่ละเอียดกว่าบริเวณจุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 3.36 ส่วนที่กริดสุทธิขนาดอื่นจะได้จากการเปลี่ยนแปลงค่า Number of Division ของ Edge Sizing โดยให้ค่า Element Size เท่าเดิม



รูปที่ 3.36 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing

หลังจากได้จำนวนกริดสุทธิแล้วทำการเลือกเส้นขอบในแบบจำลองแล้วตั้งชื่อให้เส้นขอบที่เลือกไว้เช่น Wall, Inlet water, Inlet nitrogen, Outlet ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 แสดงการตั้งค่าในโปรแกรม Meshing

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)

ในส่วนนี้จะมีลักษณะการตั้งค่าที่เหมือนกับในส่วนที่ 1 ของหัวข้อ 3.1

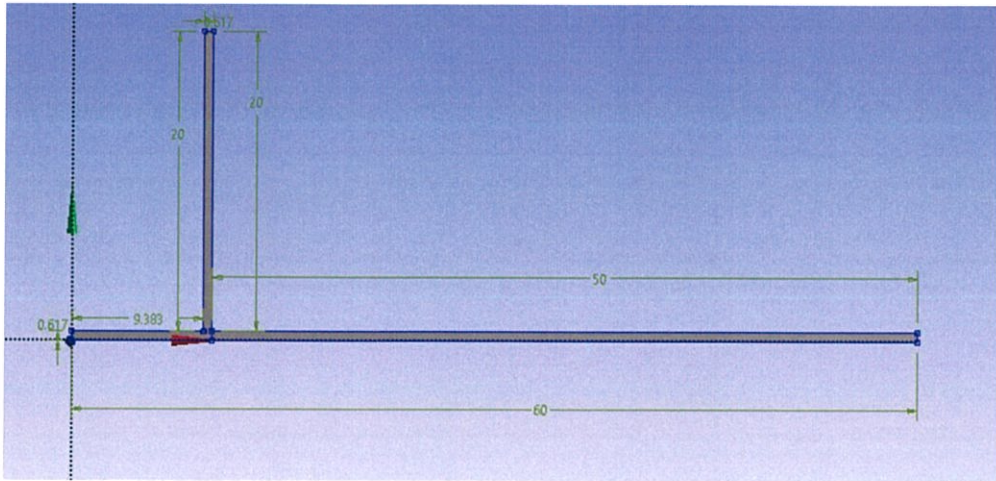
3.3 ของไหลสถานะเดียว

การศึกษานี้ถูกกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการศึกษาไว้ดังนี้

1. ของไหลเป็นแบบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady Flow)
2. การไหลเป็นแบบสองมิติ (Two-Dimensional)
3. ของไหลเป็นของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) ที่มีคุณสมบัติคงที่
4. ไม่คิดผลของการสูญเสียจากความหนืดและความเค้นเฉือน
5. สมมุติให้การไหลเป็น Fully developed ก่อนจะเข้าสู่ช่วงให้ความร้อน
6. ไม่คิดผลของการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

3.3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)

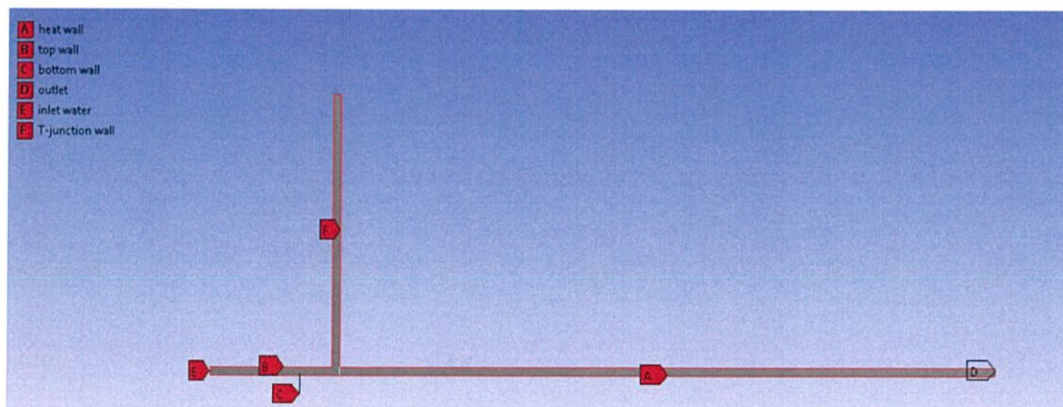
การสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาสามารถเพื่อนำไปใช้หาคำตอบในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองสามารถสร้างโดยใช้โปรแกรม Design Modeler ใน ANSYS โดยมีขนาดดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 แสดงขนาดของแบบจำลองใน Design Modeler

3.3.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)

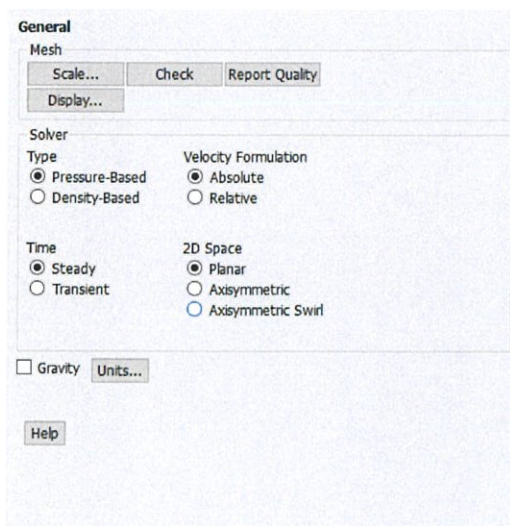
กริดที่เหมาะสมคือ 105,000 กริด สำหรับการสร้างกริดจะเหมือนกับหัวข้อ 3.2.2 ในส่วนการตั้งชื่อให้เงื่อนไขขอบเขตนั้นแสดงดังรูปที่ 3.39



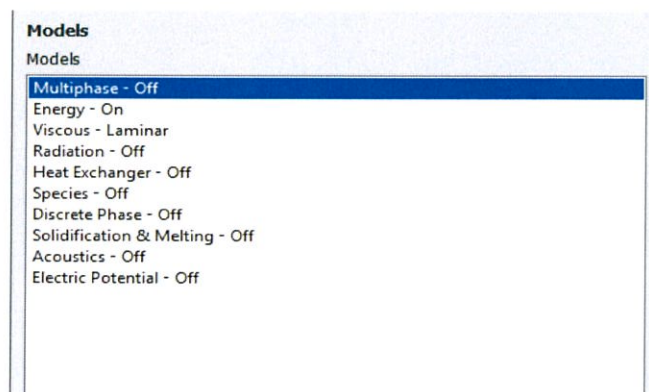
รูปที่ 3.39 แสดงการตั้งชื่อเงื่อนไขขอบเขต

3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)

การไหลของไหลสถานเดียวเป็นแบบ Steady ดังรูปที่ 3.40 โดยเงื่อนไขอื่นๆใช้ที่สภาวะเริ่มต้นของโปรแกรม



รูปที่ 3.40 การตั้งเงื่อนไขในโปรแกรม Fluent

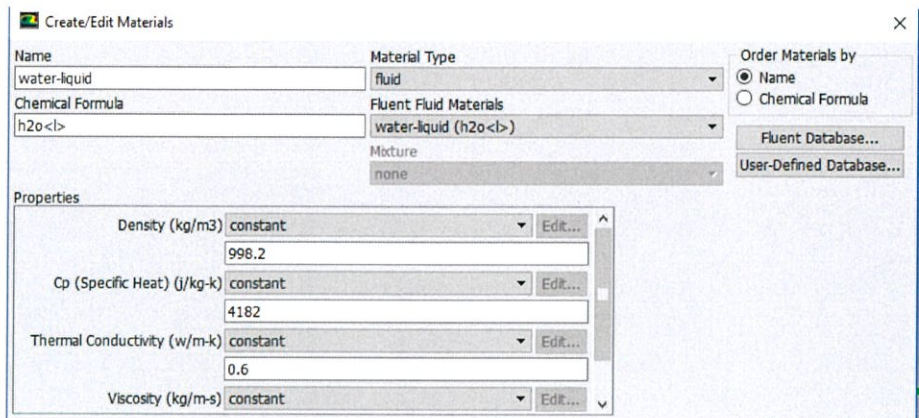


รูปที่ 3.41 แสดงการเลือกแบบจำลองพลังงานและโมเดลความหนืด

เลือก Viscous เป็นการไหลแบบ Laminar flow ดังรูปที่ 3.41 เพราะการคำนวณจากสมการเรย์โนลด์์นัมเบอร์ที่ความเร็วน้ำ 0.19 m/s

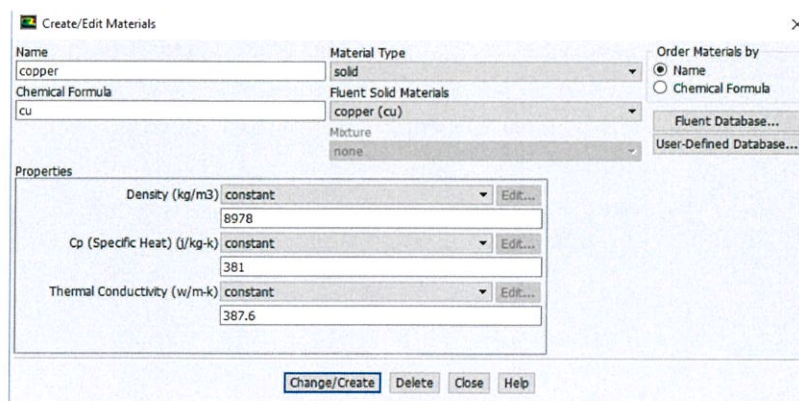
$$\text{ดังนั้นจะได้ } Re = \frac{998.2 \times 0.19 \times 0.617 \times 0.001}{0.001003} = 233.337$$

ซึ่ง $Re < 2300$ ดังนั้นจึงสรุปว่าเป็นการไหลแบบ Laminar ต่อกำหนดคุณสมบัติของไหลที่ตามรูปที่ 3.42

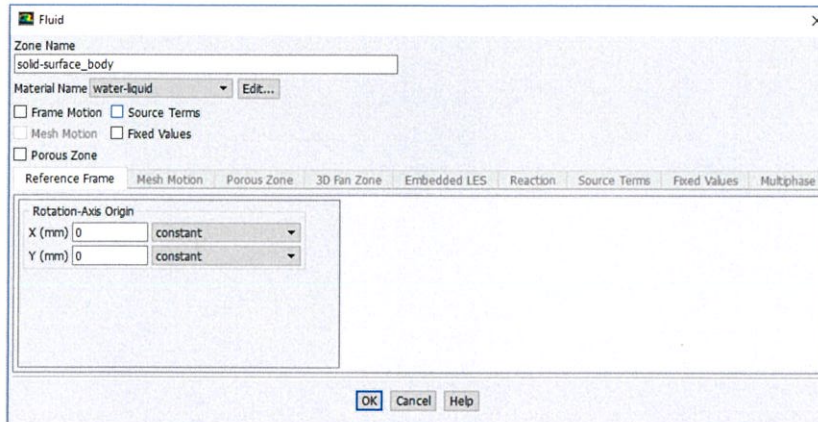


รูปที่ 3.42 แสดงการเลือกคุณสมบัติของน้ำ

กำหนดคุณสมบัติของท่อที่เป็นของแข็งตามรูปที่ 3.43 รวมถึงตั้งค่าให้พื้นที่ภายในมีแต่สถานะน้ำอย่างเดียวตามรูปที่ 3.44

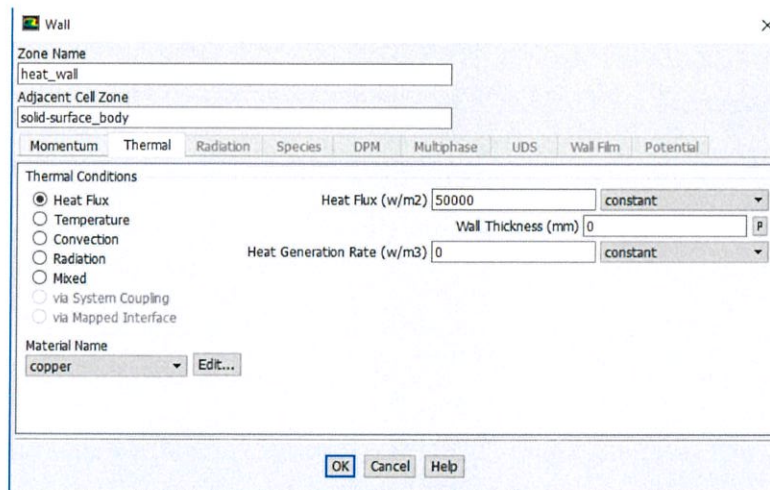


รูปที่ 3.43 แสดงการเลือกคุณสมบัติของท่อ



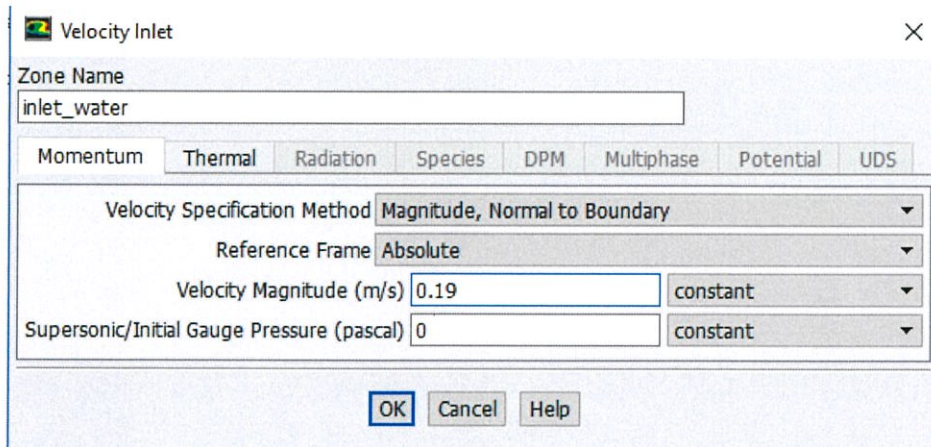
รูปที่ 3.44 การตั้งค่าให้พื้นที่เป็นแต่สถานะน้ำ

จากผนังส่วนที่ให้ความร้อนด้วย Constant heat flux ทั้ง 2 ด้าน กำหนด Heat flux = $50,000 \text{ W/m}^2$ ดังรูปที่ 3.45

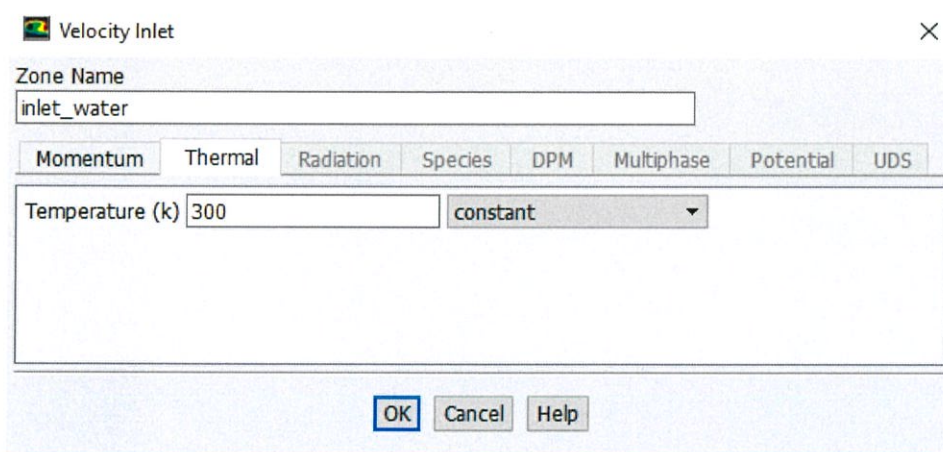


รูปที่ 3.45 แสดงการตั้งค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผนังส่วนที่ให้ความร้อน

หลังจากนั้นกำหนดความเร็วน้ำที่ทางเข้าเป็น 0.19 m/s และให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทางเข้าเป็น 300 K ตามรูปที่ 3.46 และรูปที่ 3.47

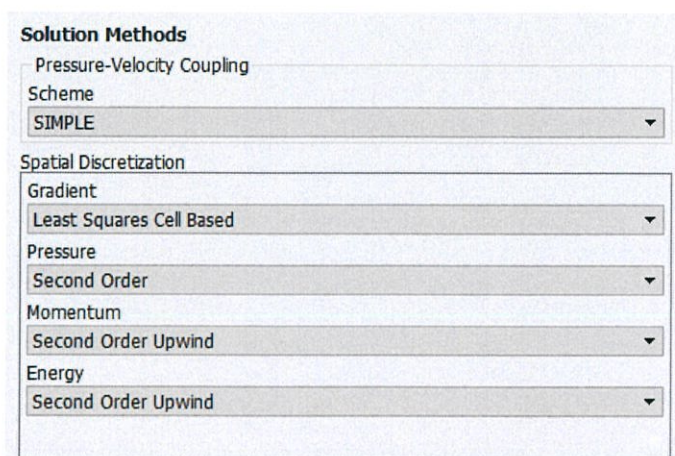


รูปที่ 3.46 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของสถานะน้ำ

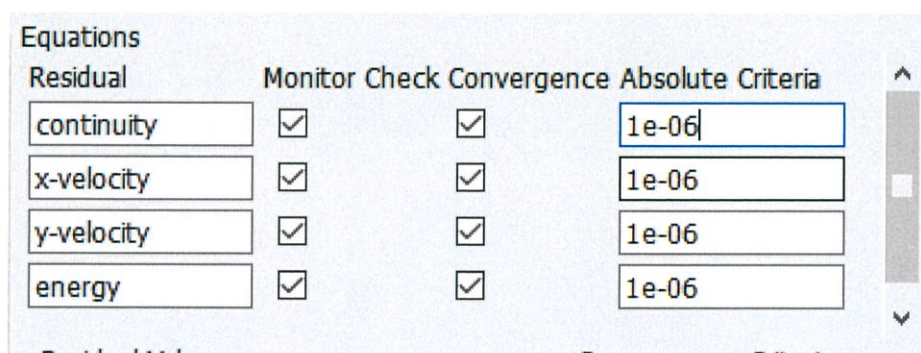


รูปที่ 3.47 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตอุณหภูมิของสถานะน้ำ

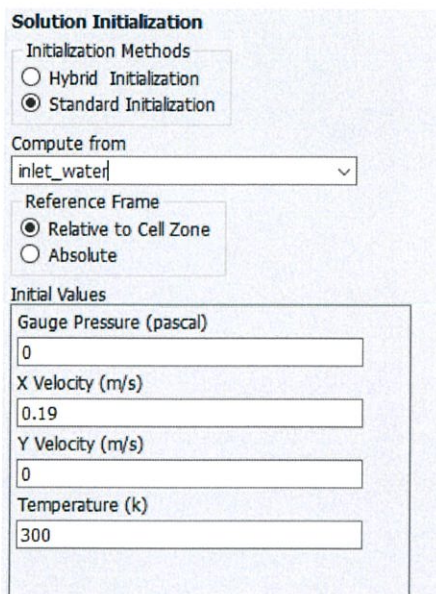
ที่ Solution Methods กำหนดวิธีการแก้ปัญหาคำตอบ ตามรูปที่ 3.48 และที่ส่วน Residuals กำหนดให้ค่า Convergence Absolute Criteria เป็น 10^{-6} ทั้งหมด ตามรูปที่ 3.49



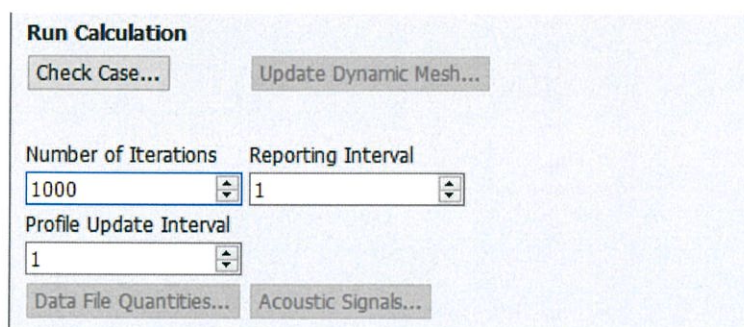
รูปที่ 3.48 การกำหนด Solution Methods



รูปที่ 3.49 การกำหนดค่า Convergence Absolute Criteria การกำหนดค่าคำตอบเริ่มต้นจะให้เริ่มต้นจาก inlet_water ดังรูปที่ 3.50



รูปที่ 3.50 รูปแสดงการกำหนดค่าตอบเริ่มต้น



รูปที่ 3.51 การกำหนดจำนวนการทำซ้ำ

และในขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะกำหนดให้ Number of Iterations เป็น 1000 ครั้ง ดังรูปที่ 3.51

3.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของไหลสถานะเดียว (Validation single phase)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของไหลสถานะเดียวสามารถตรวจสอบได้จาก Bulk Mean Temperature ตามสมการสมดุลพลังงานผ่านการตัดความยาวท่อด้วยความหนา d

ได้สมการ $q_w P dx = \dot{m} c_p T_b$

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{q_w 2d}{\rho(bd)U_{avg}c_p}$$

โดยที่ q_w คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผนัง

P คือ เส้นรอบวงของส่วนที่ให้ความร้อน

\dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวล

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ

U_{avg} คือ ความเร็วเฉลี่ยตลอดระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน 2 แผ่น

b คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน 2 แผ่น

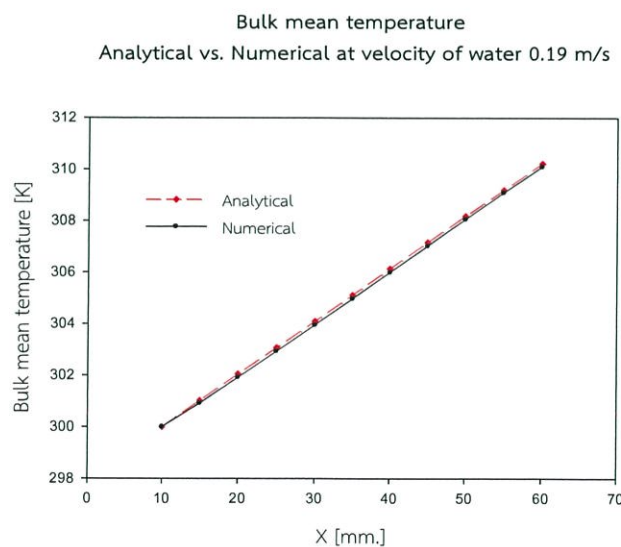
d คือ ความลึกของแผ่นขนาน

$$\text{ดังนั้นจะได้ } \frac{dT_b}{dx} = \frac{50,000 \times 2}{998.2 \times 0.617 \times 0.001 \times 0.19 \times 4,182}$$

$\frac{dT_b}{dx} = 204.343$ ดังนั้นจะได้สมการ Bulk Mean Temperature (Analytical) คือ

$$T_b = 204.343(x - 0.01) + 300$$

โดยรูปที่ 3.52 แสดงค่า Bulk Mean Temperature ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขและการคำนวณจากสมการที่อธิบายข้างต้นโดยจะพบแนวโน้มของทั้งสองวิธีมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่า Bulk Mean Temperature นั้นจะมีความสัมพันธ์กับความยาวของแผ่นขนานโดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างทั้งสองวิธีคือ 0.036%



รูปที่ 3.52 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่าง Numerical & Analytical

3.4 ของไหลสองสถานะ

การศึกษานี้ถูกกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการศึกษาไว้ดังนี้

1. การศึกษาของไหลสองสถานะใช้วิธี Volume of Fluid
2. ของไหลเป็นแบบคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient)
3. การไหลเป็นแบบสองมิติ (Two-Dimensional)
4. ของไหลเป็นของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) ที่มีคุณสมบัติคงที่
5. ของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้และไม่คำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วง
6. ไม่คิดผลของการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

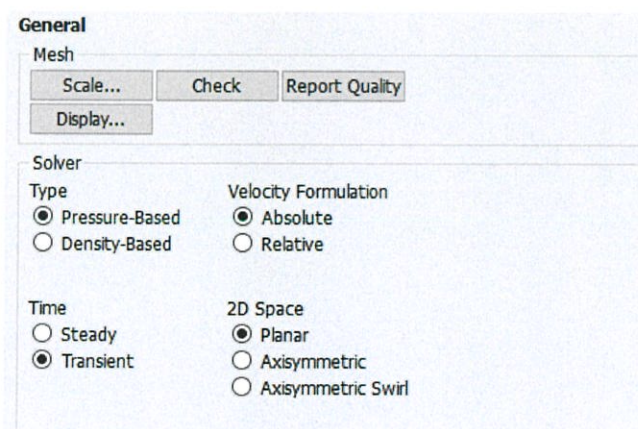
3.4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)

การสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาสามารถเพื่อนำไปใช้หาคำตอบในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองสามารถสร้างโดยใช้โปรแกรม Design Modeler ใน ANSYS โดยรูปภาพแสดงเหมือนกับหัวข้อ 3.3.1

3.4.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)

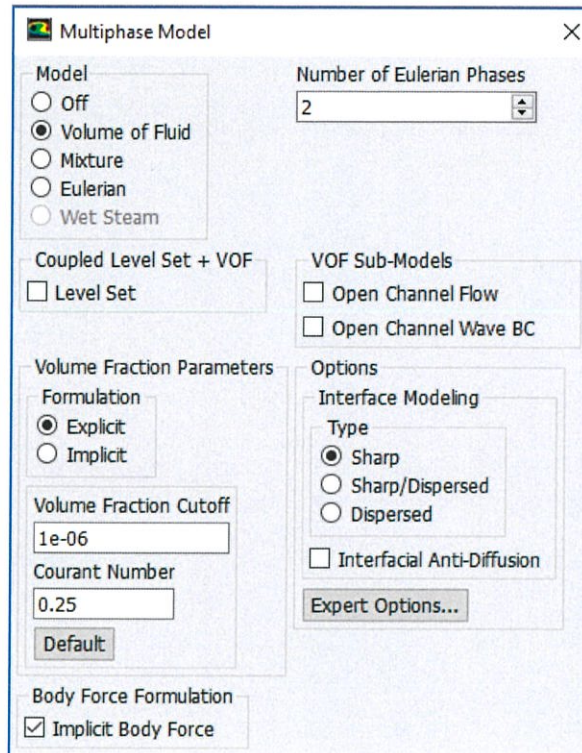
ลักษณะการสร้างกริดและการสร้างชื่อขอบเขตเงื่อนไขเหมือนกับในหัวข้อ 3.3.2 เพียงแต่เพิ่มทางเข้าของอากาศที่ส่วนต่อ T-junction

3.4.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)



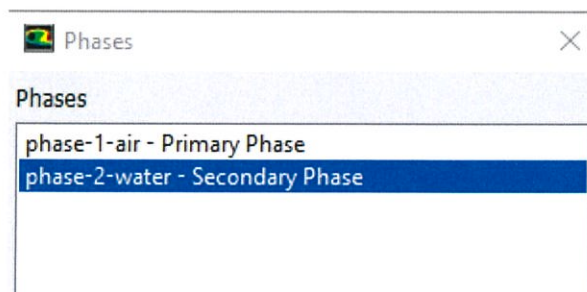
รูปที่ 3.53 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของของไหลสองสถานะ

จากรูปที่ 3.53 จะกำหนดให้ของไหลสองสถานะเป็นการไหลแบบคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลา เงื่อนไขนอกจากนั้นให้ใช้ค่าเริ่มต้นจากโปรแกรม



รูปที่ 3.54 การกำหนดแบบจำลองของของไหลสองสถานะ

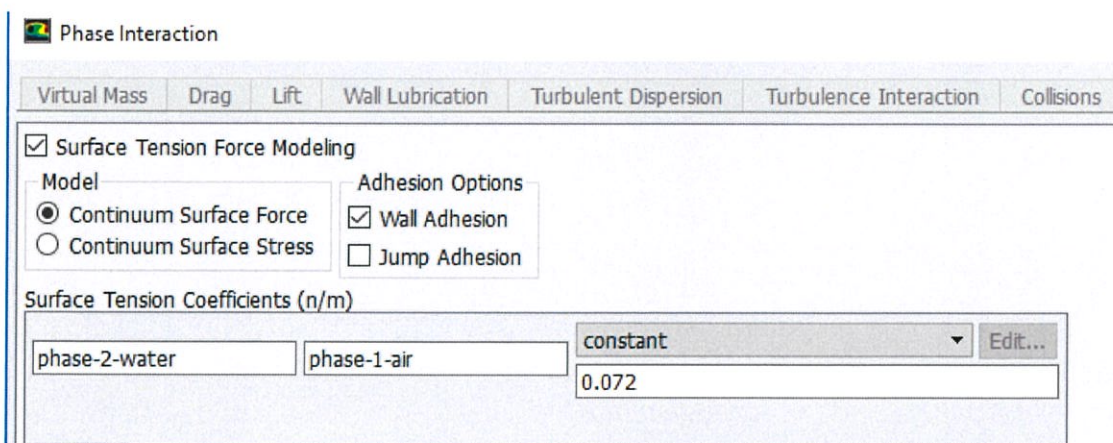
การตั้งค่าที่ Models เลือกที่ Multiphase จากนั้นเลือกที่ Volume of Fluid จะมีหน้าต่างเพิ่มขึ้นมาให้ตั้งค่า โดยที่ Body Force Formulation เลือก Implicit Body Force ส่วนคำสั่งอื่นในหน้าต่างให้ใช้ค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.54 การตั้งค่าที่ Materials จะเหมือนกับในหัวข้อ 3.3.3 เพียงแต่จะมีการตั้งสถานะอันดับที่หนึ่งและสถานะอันดับที่สอง



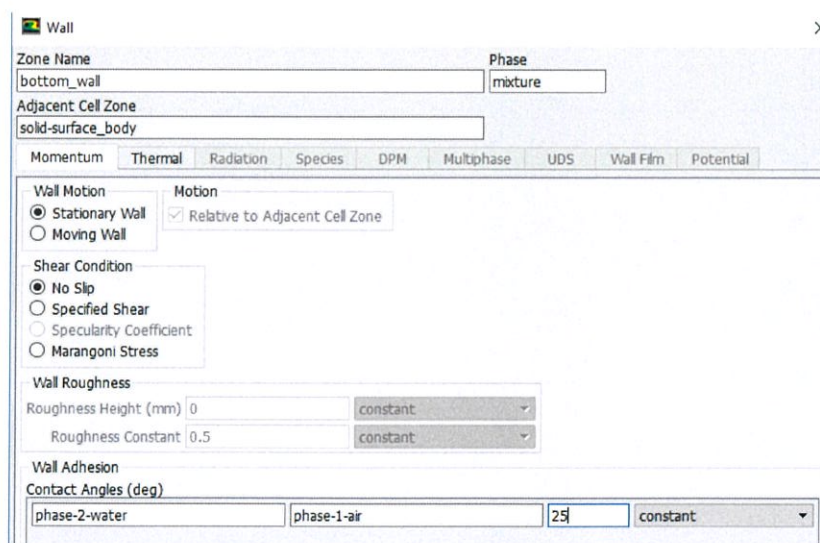
รูปที่ 3.55 การตั้งค่าอันดับของของไหลสองสถานะ

จากรูปที่ 3.55 จะมีการกำหนดอันดับของสถานะของไหลโดยให้อันดับที่หนึ่งเป็นสถานะอากาศและอันดับที่สองเป็นสภาวะน้ำ

การตั้งค่า Phase Interaction ระหว่างสองสถานะนั้นที่ Adhesion Options ใช้ Wall Adhesion โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวระหว่างสองสถานะมีค่า 0.072 N/m เป็นค่าที่อ้างอิงจากการคำนวณเชิงตัวเลขของ Padoin et al. (2016) ดังรูปที่ 3.56

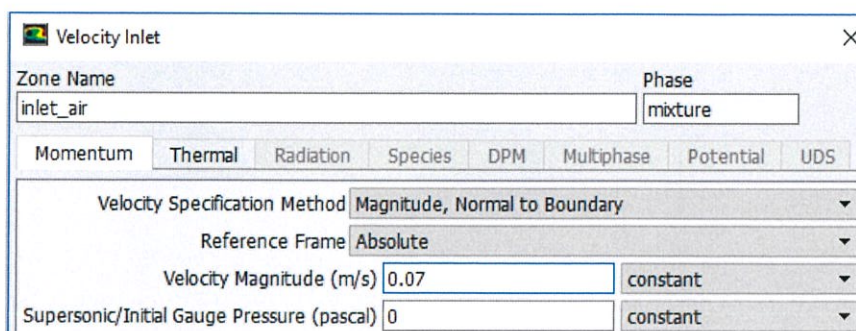


รูปที่ 3.56 แสดงการตั้งค่าความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองสถานะ

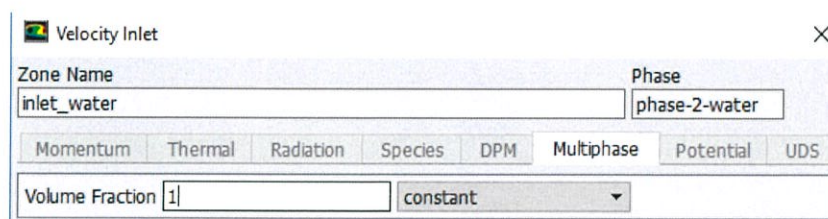


รูปที่ 3.57 การตั้งค่า Contact angle ที่ผนังทุกด้านของแบบจำลอง

ผนังส่วนอื่น ๆ รวมถึงผนังส่วนที่ให้ความร้อนจะกำหนดมุม Contact angle เป็น 25 องศา ดังรูปที่ 3.57 การกำหนดความร้อนที่ผนังของส่วนให้ความร้อนยังคงใช้สภาวะเดียวกับการไหลแบบสถานะเดียวและความเร็วของน้ำยังคงเป็น 0.19 m/s เท่ากับการไหลสถานะเดียว และให้ความเร็วของอากาศเป็น 0.07 m/s ดังรูปที่ 3.58 ค่า Volume fraction ของน้ำเป็น 1 ส่วนของอากาศเป็น 0 ดังรูปที่ 3.59



รูปที่ 3.58 แสดงการตั้งความเร็วที่ทางเข้าของอากาศ



รูปที่ 3.59 แสดงการตั้งค่าสัดส่วนปริมาตรที่ทางเข้าของน้ำ

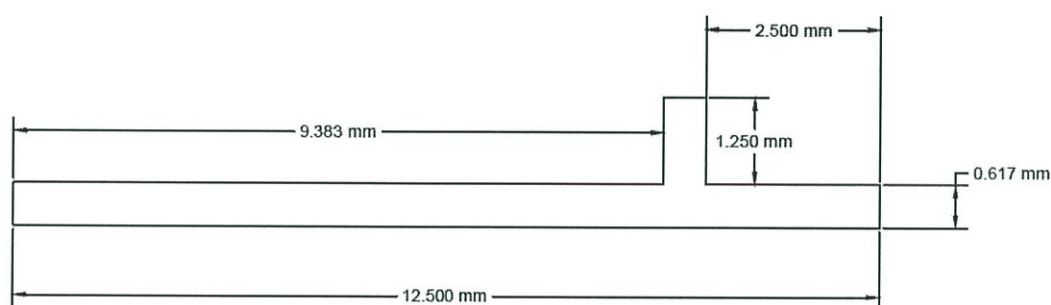
เงื่อนไขของแบบจำลองต่อจากนี้ใช้วิธีการเหมือนกับหัวข้อ 3.1.3 ของการตรวจสอบแบบจำลอง

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

4.1 รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ

สำหรับแบบจำลองที่ใช้จะเป็นท่อสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 0.617 mm. และความยาว 12.5 mm. ลักษณะท่อที่ทางเข้าเป็นแบบตัวที (T-junction) ดังรูปที่ 4.1



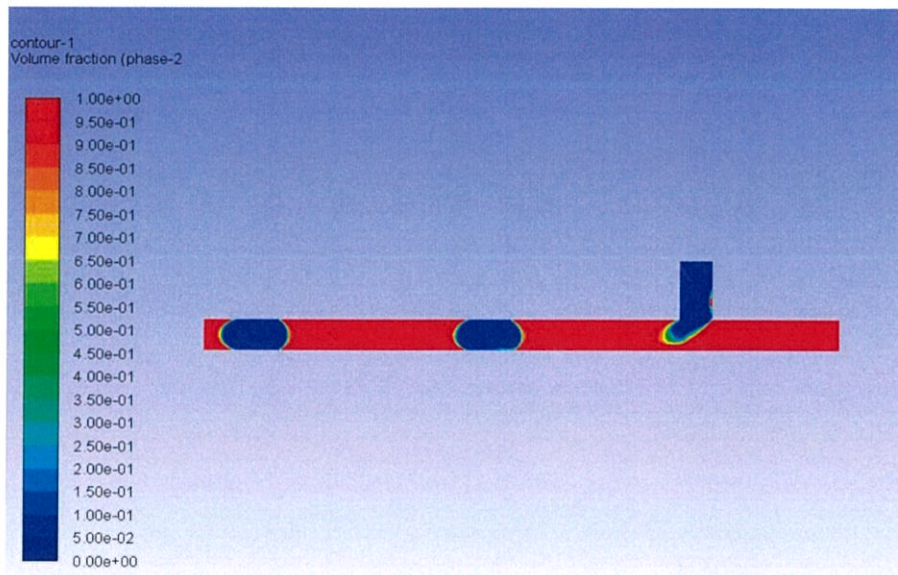
รูปที่ 4.1 แสดงขนาดของท่อสี่เหลี่ยมที่ทางเข้าตัวที

4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะพิจารณาจากรอยต่อระหว่างของไหลสองสถานะ (Interface) ว่าในแต่ละความละเอียดของกริดที่ค่าใดจะทำให้เกิดรอยต่อระหว่างของไหลสองสถานะน้อยกว่าและเปรียบเทียบรูปแบบการไหลเทียบกับรูปแบบการไหลจากงานวิจัย Choi et al. (2011) สารทำงานที่ใช้คือ น้ำ-ไนโตรเจน กรณีรูปแบบการไหลแบบ slug ใช้ความเร็วแก๊ส (ไนโตรเจน) ที่ทางเข้าคือ 0.7 m/s และความเร็ว น้ำที่ทางเข้าคือ 0.19 m/s

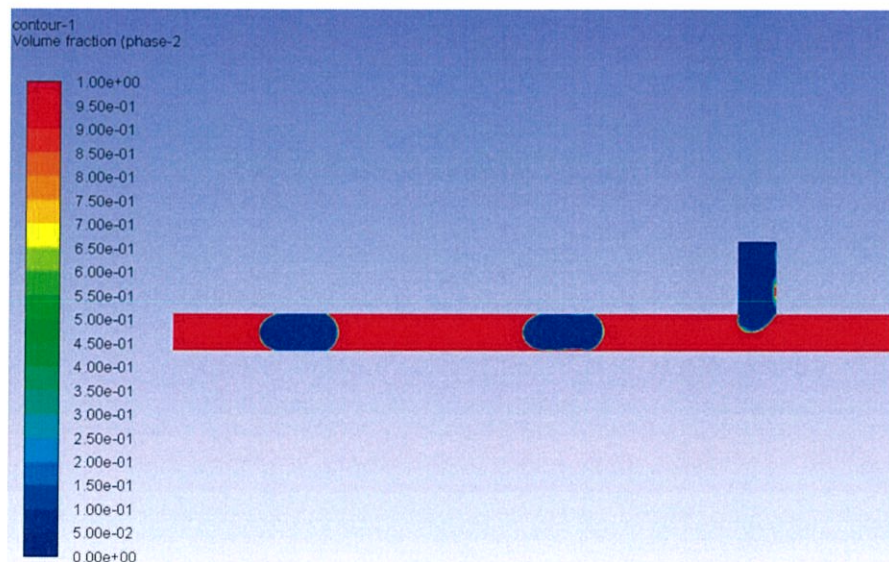
ตรวจสอบกริดโดยการเลือกขนาดกริดสุทธิตาม 4 ค่า คือ 28,000, 61,000, 140,000 และ 200,000 กริด โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตของการไหลสองสถานะที่เหมือนกันได้ผลลัพธ์ดังรูปต่อไปนี้

1. กริด 28,000



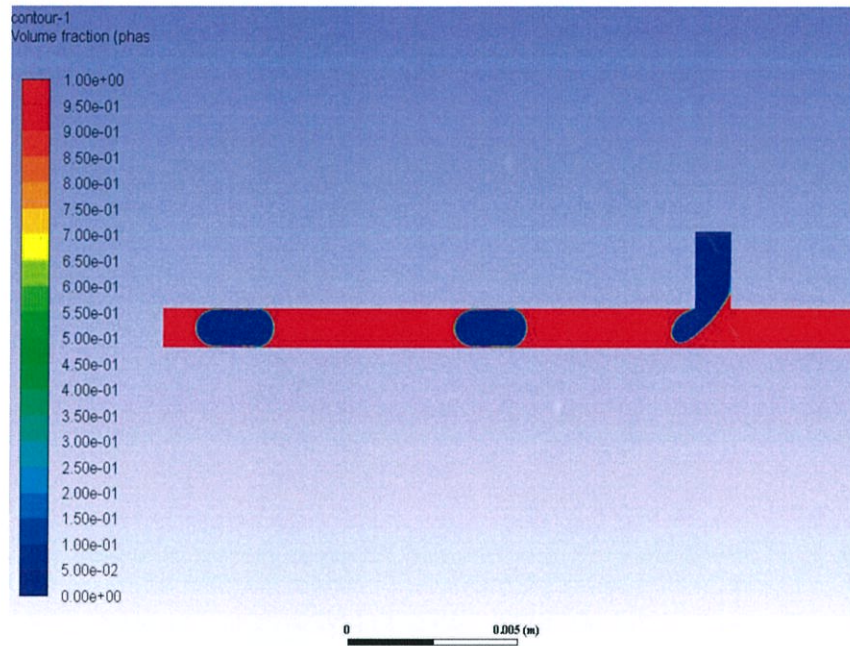
รูปที่ 4.2 แสดงจำนวนกริดที่ 28,000

2. กริด 61,000



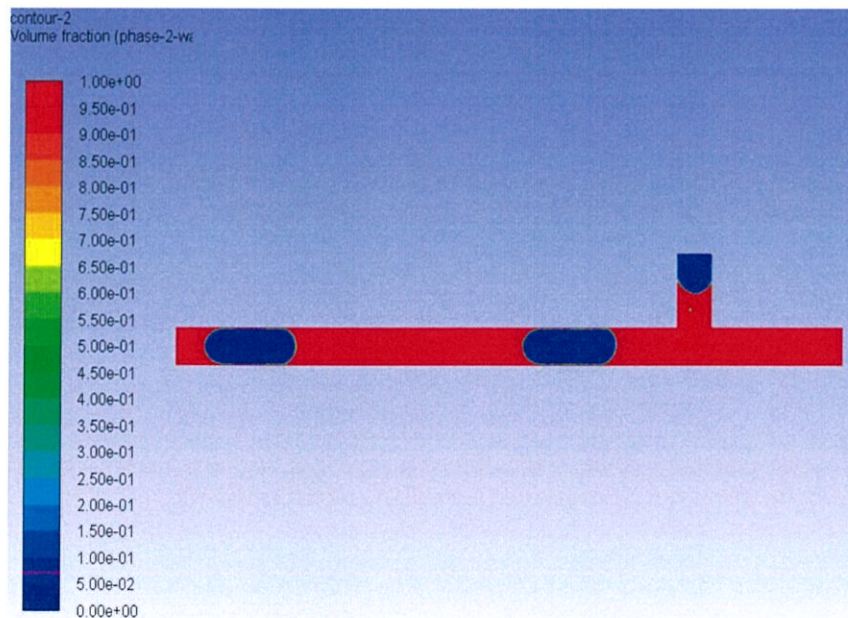
รูปที่ 4.3 แสดงจำนวนกริดที่ 61,000

3. กริด 140,000



รูปที่ 4.4 แสดงจำนวนกริดที่ 140,000

4. กริด 200,000



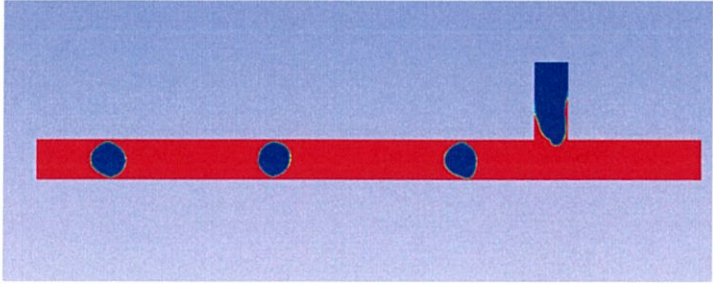
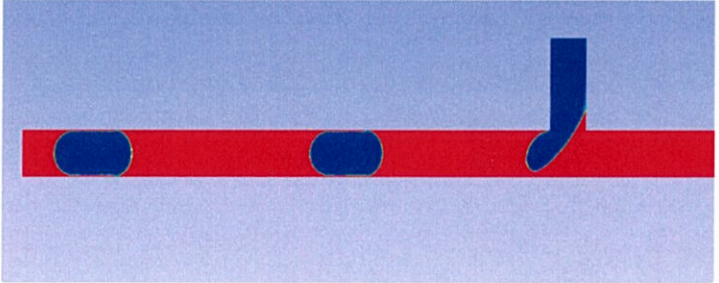
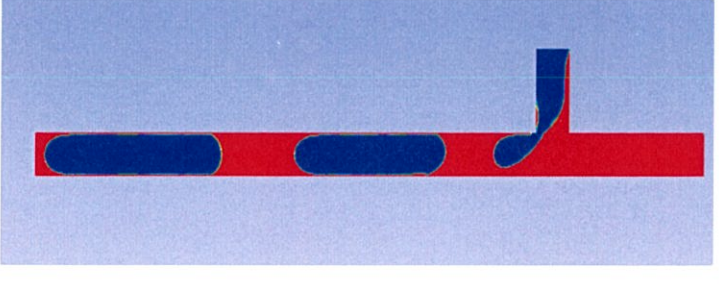
รูปที่ 4.5 แสดงจำนวนกริดที่ 200,000

จากผลการเปรียบเทียบค่ากริดที่แตกต่างกันของรูปแบบการไหลแบบ slug โดยสถานะแก๊ส แสดงเป็นสีน้ำเงิน ส่วนสถานะของเหลวแสดงเป็นสีแดง สามารถสรุปได้ว่าที่จำนวนกริด 28,000 และ จำนวนกริด 61,000 แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่ารอยต่อระหว่างสองสถานะ (Interface) ของรูปแบบการไหลแบบ slug มีความไม่คมชัด แต่เมื่อจำนวนกริดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้รอยต่อระหว่างสองสถานะ (Interface) ชัดเจนขึ้น นอกจากนี้ที่จำนวนกริด 28,000 พบว่าไม่มีฟิล์มของเหลวเกิดขึ้นระหว่างผนังกับก้อนแก๊สในขณะที่จำนวนกริด 61,000 เกิดฟิล์มของเหลวแค่ผนังด้านล่างและเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าฟิล์มของเหลวหายไป

การเลือกใช้กริดที่เหมาะสม

จำนวนกริด 140,000 ดังรูปที่ 4.4 พบว่ารอยต่อระหว่างสองสถานะ (Interface) มีความคมชัดขึ้นกว่าจำนวนกริด 28,000 และ 61,000 โดยที่กริด 140,000 จะมีการเกิดฟิล์มของเหลวขึ้นระหว่างผนังและก้อนแก๊สตลอดการไหลภายในท่อ นอกจากนี้ที่จำนวนกริด 200,000 (รูปที่ 4.5) พบว่ารอยต่อระหว่างสองสถานะ (Interface) มีความคมชัดมากและเกิดฟิล์มของเหลวขึ้นระหว่างผนังและก้อนแก๊สตลอดการไหลภายในท่อ แต่พบว่าลักษณะรูปร่างของก้อนแก๊สมีขนาดยาวกว่าทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาทั้งหมดและใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าควรเลือกใช้จำนวนกริด 140,000 เป็นค่ากริดที่เหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด

4.1.2 ผลลัพธ์รูปแบบการไหลสองสถานะจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

V_g (m/s)	V_l (m/s)	รูปแบบการไหล	ภาพแสดงรูปแบบการไหลสองสถานะ
0.07	0.43	Bubbly flow	
0.07	0.19	Slug flow	
0.32	0.19	Elongated Slug flow	

ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบการไหลสองสถานะที่ความเร็วน้ำและอากาศที่ต่างกัน

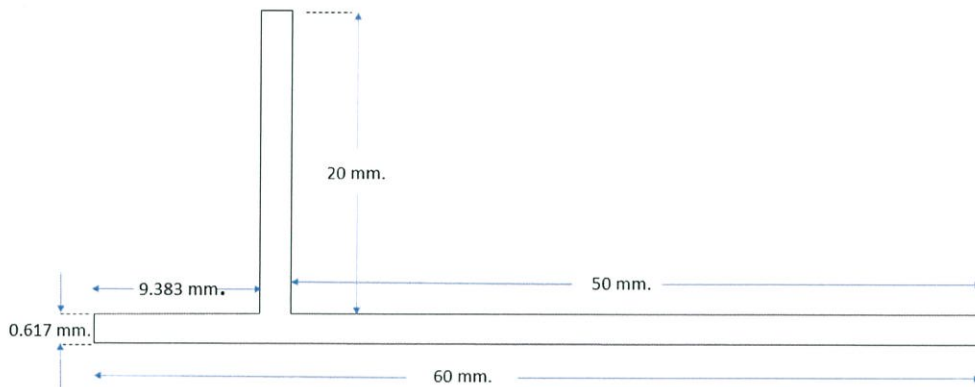
รูปแบบการไหล	ความยาวของฟองแก๊ส จากวิเคราะห์เชิงตัวเลข	ความยาวของฟองแก๊ส จากผลการทดลอง	เปอร์เซ็นต์ความคลาด เคลื่อน
Bubbly flow	0.83 mm.	0.55 mm.	50.90 %
Slug flow	1.67 mm.	1.45 mm.	15.17%
Elongated slug flow	3.45 mm.	2.86 mm.	20.63%

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างความยาวฟองของแก๊สจากวิเคราะห์เชิงตัวเลขและผลการทดลองของ Choi et al. (2011)

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความยาวฟองแก๊สระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลขและผลการทดลองของ Choi et al. (2011) มีค่ามากที่สุดที่ 50.90 % ที่ความเร็วแก๊สและความเร็วของเหลว 0.07 m/s และ 0.43 m/s ตามลำดับ ในทางกลับกันค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วแก๊สและความเร็วของเหลวเปลี่ยนแปลงไป

4.2 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

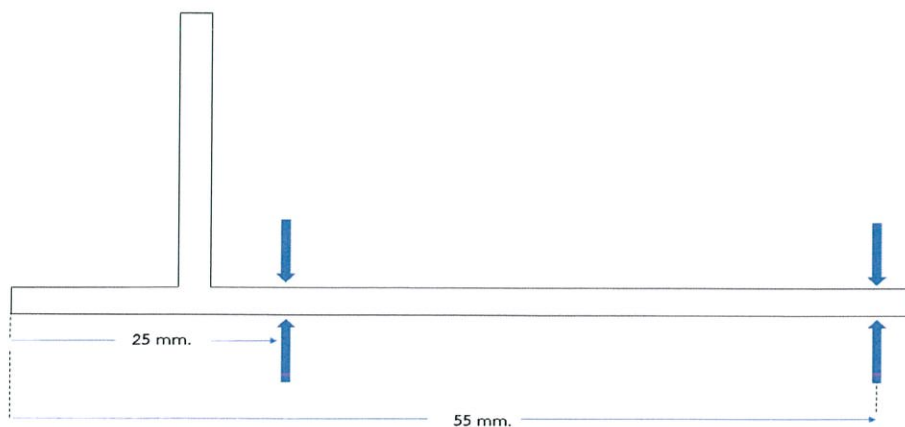
สำหรับแบบจำลองที่ใช้จะเป็นท่อสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 0.617 mm. และความยาว 60 mm. ลักษณะท่อที่ทางเข้าเป็นแบบตัวที (T-junction) โดยทำการติดฟลักซ์ความร้อนที่ผนังของท่อด้านบนและด้านล่างด้วยค่า $50,000 \text{ W/m}^2$ ตั้งแต่ที่ระยะ 10 mm. จนถึงระยะ 60 mm. จากทางเข้า



รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองที่ติดฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของผนังท่อ

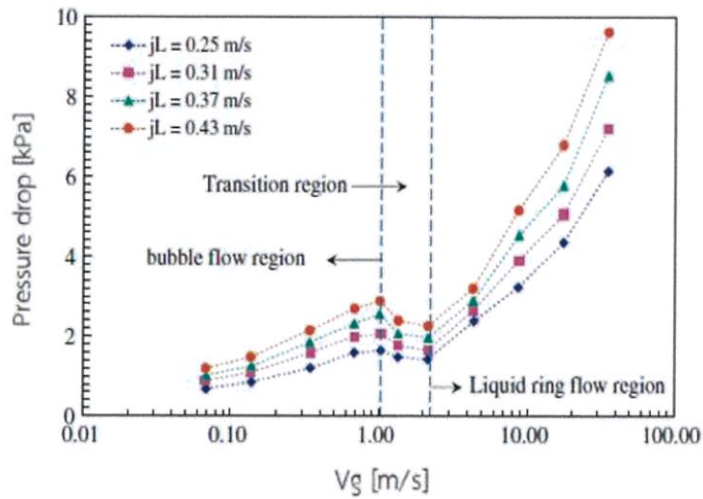
4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในหัวข้อนี้เป็นขนาดจริงตามการทดลอง จึงสามารถใช้ข้อมูลจากผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้ได้ โดยทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเทียบความดันตกที่ตำแหน่ง 25 mm. และ 55 mm โดยมีตำแหน่งจุดวัดดังรูปที่ 4.7



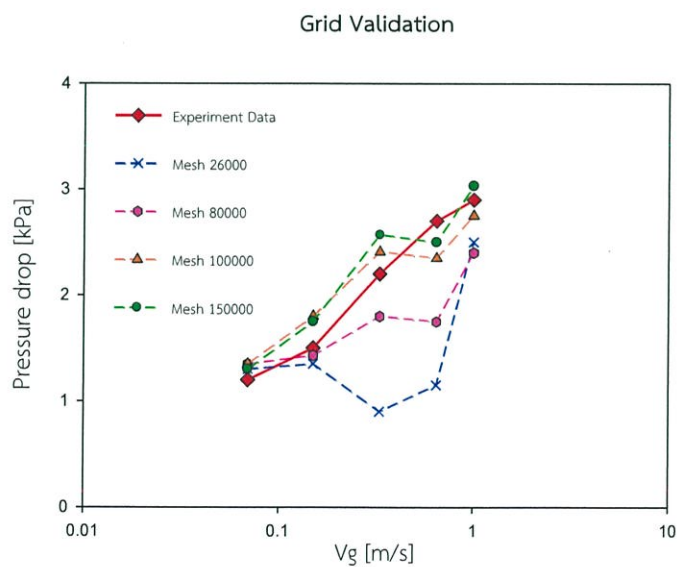
รูปที่ 4.7 แสดงจุดที่วัดความดันตกของแบบจำลอง

ซึ่งการตรวจสอบความดันตกจากการทดลองที่จะเทียบกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขจะเลือกใช้ผล
ความเร็วของของไหล 0.43 m/s และพิจารณาเฉพาะช่วง Bubble flow region เท่านั้นในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความดันตกจากการทดลองของ Choi et al. (2011)

การพิจารณาโดยเลือกขนาดกริดสุทธิมา 4 ค่า คือ 26,000, 80,000, 100,000 และ
150,000 กริด ที่ความเร็วแก๊สคือ 0.07 m/s, 0.15 m/s, 0.33 m/s, 0.65 m/s และ 1 m/s ส่วน
ของความเร็วของเหลวคือ 0.43 m/s โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตของการไหลสองสถานะที่เหมือนกันในแต่
ละกริดจะได้ผลลัพธ์ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 แสดงผลลัพธ์ที่ได้ของความดันที่กริดต่างๆโดยพิจารณาในช่วง bubble flow
region เท่านั้น

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในรูปที่ 4.9 สามารถสรุปได้ว่า ผลลัพธ์ที่ได้เทียบกับผลการทดลองที่กริด 26000, 80000, 100,000 และ 150,000 พบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้คือ 33.33%, 19.71%, 11.05% และ 9.05% ตามลำดับ โดยที่จำนวนกริด 100,000 และ 150,000 มีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ จึงเลือกใช้กริดขนาด 100,000 สำหรับท่อ T-Junction ในการวิเคราะห์การไหลเป็นหลัก

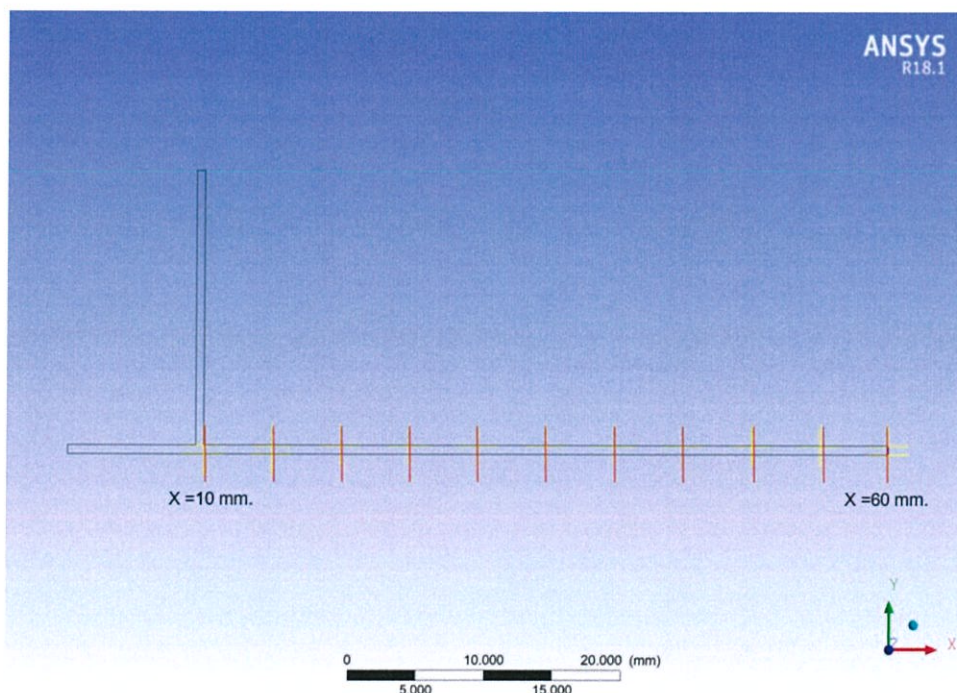
4.2.2 ผลลัพธ์การถ่ายเทความร้อนจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การถ่ายเทความร้อนจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถจำแนกการวิเคราะห์ได้ออกเป็นสองแบบ คือ การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวและการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะ

1. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว
2. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะ

1. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของไหลสถานะเดียว

สำหรับสารทำงานที่ใช้คือ น้ำ โดยกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่า 300 K ซึ่งพิจารณาที่ระยะ $x = 10$ mm. ถึง $x = 60$ mm. ที่ถูกติดตั้งด้วยฟลักซ์ความร้อนขนาด $50,000 \text{ W/m}^2$ โดยการพิจารณาจะแบ่งช่วงพิจารณาเป็น 11 ตำแหน่งดังรูปที่ 4.10

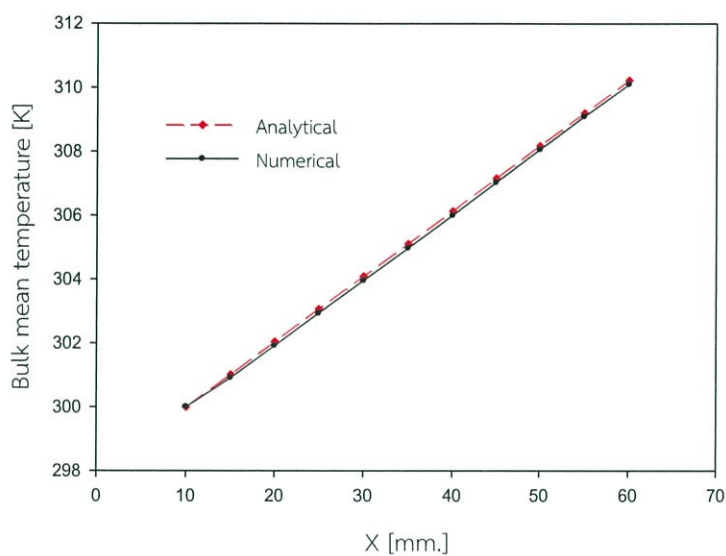


รูปที่ 4.10 แบบจำลองที่พิจารณาโดยแบ่งช่วงพิจารณา 11 ตำแหน่ง

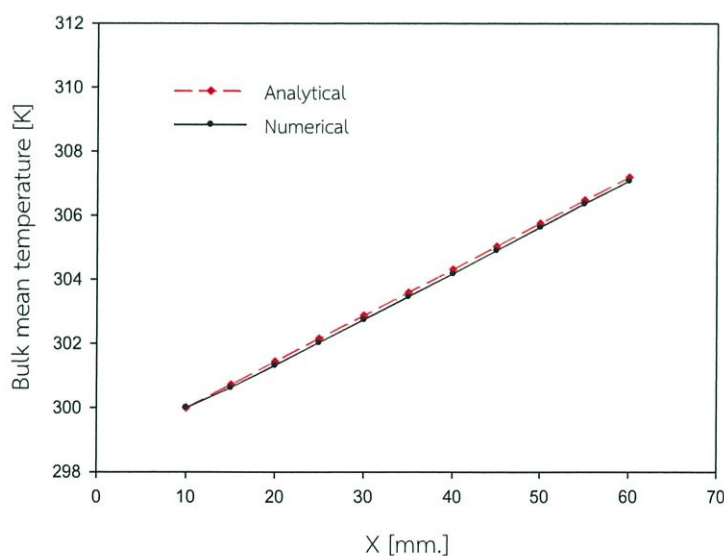
วิเคราะห์ bulk mean temperature หรือ อุณหภูมิเฉลี่ยตามระนาบแกน y ที่จุด x แต่ละจุดและทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์โดยพิจารณาจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่เทียบกับการวิเคราะห์เชิง

ตัวเลขที่ได้จากสมการ $T_b = 204.343(x - 0.01) + 300$ และ $T_b = \frac{\int_0^y uyTdy}{\int_0^y udy}$ ตามลำดับเพื่อ

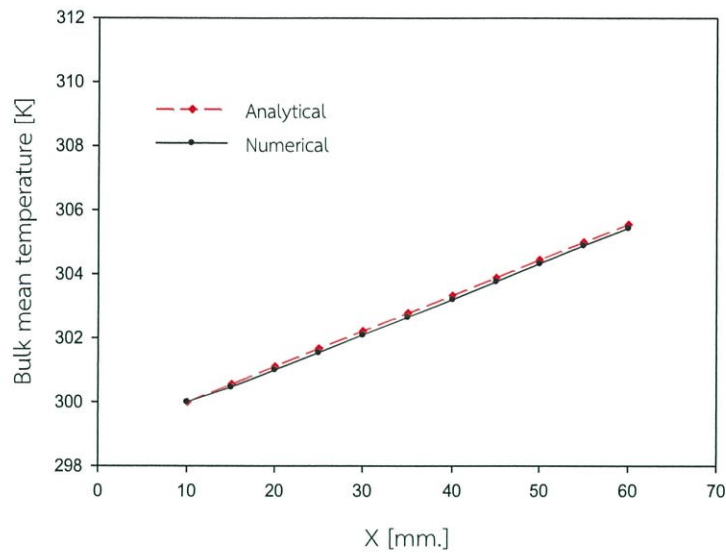
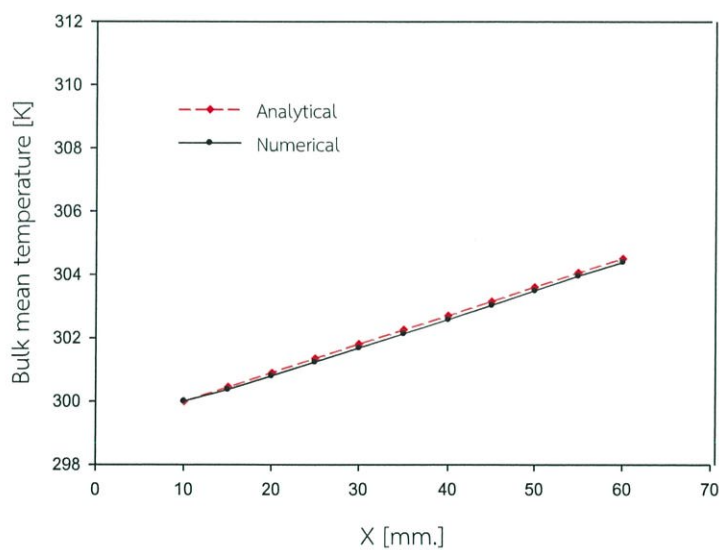
ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลของไหลรูปแบบเดียว โดยผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 4 ความเร็ว แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.11 ที่ความเร็วน้ำ 0.19 m/s, 0.27 m/s, 0.35 m/s และ 0.43 m/s



(a) $V_I = 0.19$ m/s



(b) $V_I = 0.27$ m/s

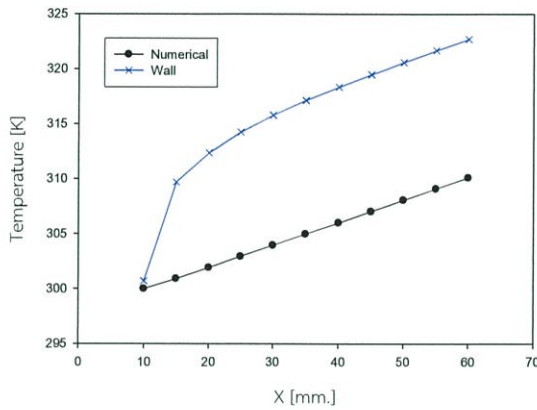
(c) $V_l = 0.35$ m/s(d) $V_l = 0.43$ m/s

รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลที่ระยะ x ต่างๆ เมื่อเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical) กับค่าที่ได้จากสมการ (Analytical)

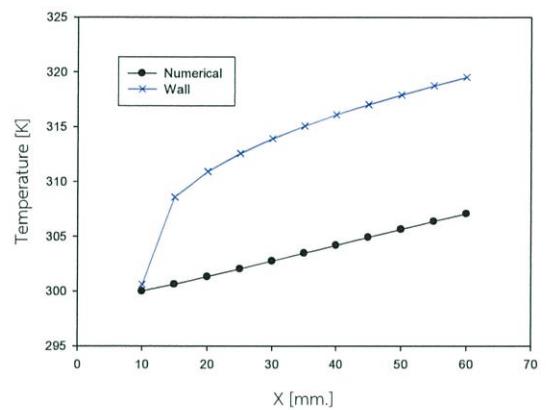
จากผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 4 ความเร็วพบว่า เส้นแนวโน้มระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลขกับค่าที่ได้จากสมการมีลักษณะคล้ายกันโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.036%, 0.035%, 0.034% และ 0.033% ที่ความเร็วน้ำ 0.19 m/s, 0.27 m/s, 0.35 m/s และ 0.43 m/s ตามลำดับ โดยค่าความ

คลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มากที่สุดคือ 0.036% พบว่าหากความเร็วของไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลงและที่ความเร็วของไหลมากกว่าจะทำให้ bulk mean temperature น้อยกว่า

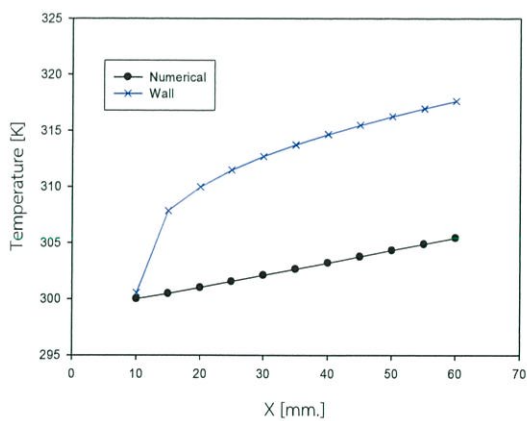
สำหรับค่า bulk mean temperature ทั้ง 4 ค่าความเร็วหากเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังท่อที่ตำแหน่ง x เดียวกันจะมีลักษณะความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



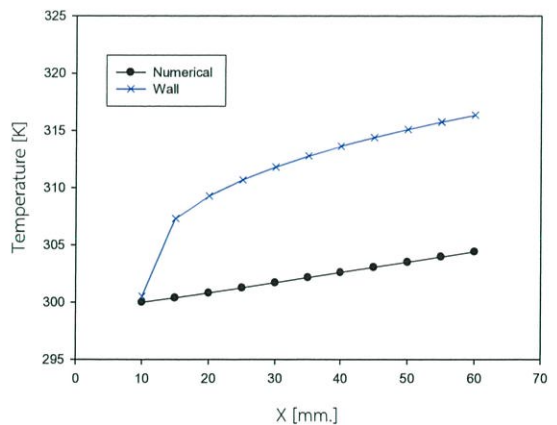
(a) $V_1 = 0.19$ m/s



(b) $V_1 = 0.27$ m/s



(c) $V_1 = 0.35$ m/s



(d) $V_1 = 0.43$ m/s

รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของ bulk mean temperature และอุณหภูมิผนังท่อเฉลี่ยที่ระยะ x จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำค่าไปหา Nusselt number ต่างๆได้จากสมการดังต่อไปนี้

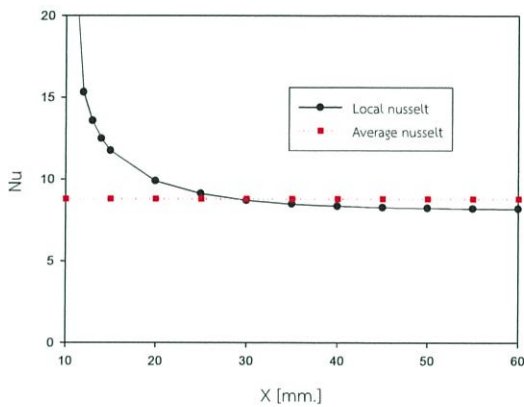
1. หา $h(x)$ ที่แต่ละ x จากสมการ $h(x) = \frac{q''}{T_{wall}(x) - T_{fluid}(x)}$ และทำการ Curve fitting แต่ละ

จุดข้อมูลเพื่อสร้างสมการ $h(x)$

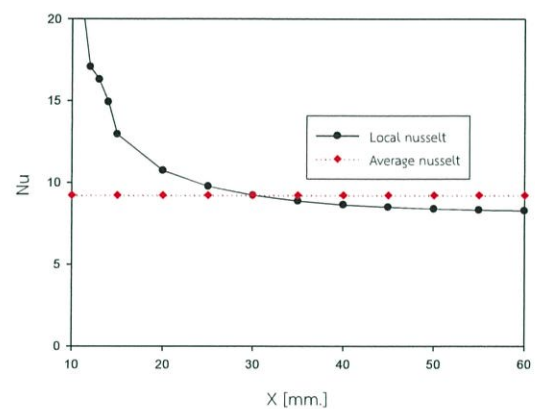
2. หา h_{avg} จากสมการ $h_{avg} = \frac{1}{L_{ch}} \int_0^{L_{ch}} h(x) dx$

3. หา Local Nusselt number ได้จากสมการ $Nu_x = \frac{h(x)D_h}{k_f}$ และหา Average Nusselt

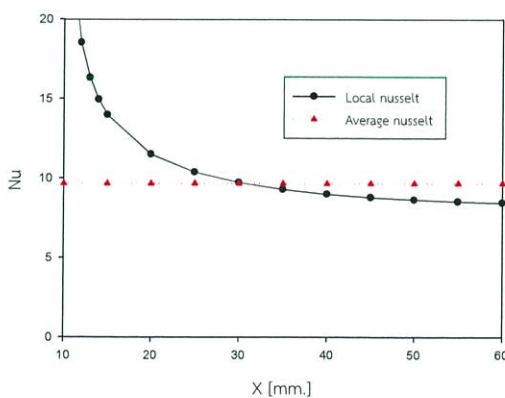
number จากสมการ $Nu_{avg} = \frac{h_{avg}D_h}{k_f}$ ค่า Nu_x และ Nu_{avg} ที่ได้แสดงไว้ในรูป 4.13 (a)-(d)



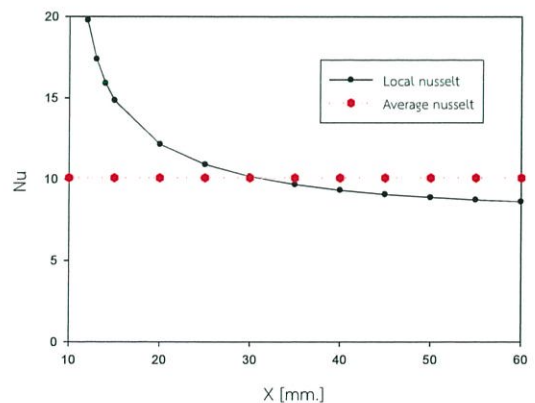
(a) $V_l = 0.19$ m/s



(b) $V_l = 0.27$ m/s



(c) $V_l = 0.35$ m/s



(d) $V_l = 0.43$ m/s

รูปที่ 4.13 แสดงค่า Local Nusselt number และ Average Nusselt number ที่ขึ้นกับระยะ x ตามความยาวท่อ

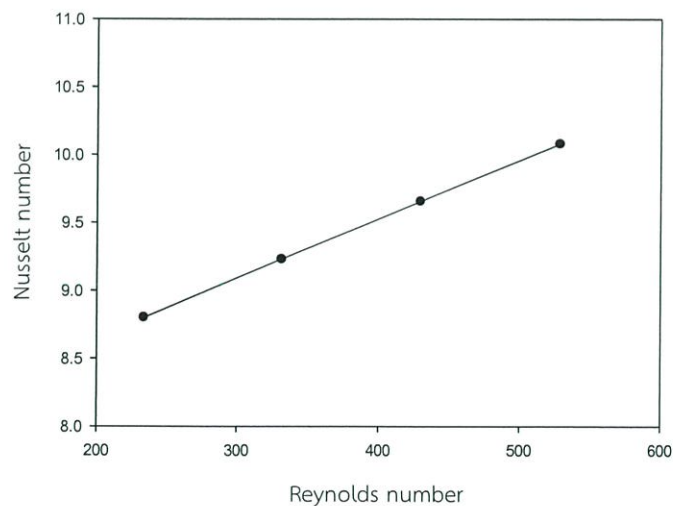
พบว่าค่าทั้ง 4 ค่าความเร็วมี Local Nusselt number ที่มีแนวโน้มลู่เข้าค่า Average Nusselt number ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 8.57%, 10.98%, 12.53% และ 13.65% ที่ความเร็วของไหล 0.19m/s, 0.27 m/s, 0.35 m/s และ 0.43 m/s ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสรุปได้ว่า ที่บริเวณทางเข้าท่อ ค่า Nusselt number จะมีค่าสูงมากแล้วลดลงอย่างรวดเร็วและจะเริ่มลู่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งที่ท่อระยะ $x = 30$ mm. โดยค่าคงที่ที่ Nu_x ลู่เข้าหา มีค่าใกล้เคียงกับ Nu_{avg}

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ย (Average Nusselt) ของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) จะได้

Reynolds number	Average Nusselt number (Single-phase)
233.34	8.79
331.59	9.23
429.83	9.66
528.08	10.08

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสถานะเดียว

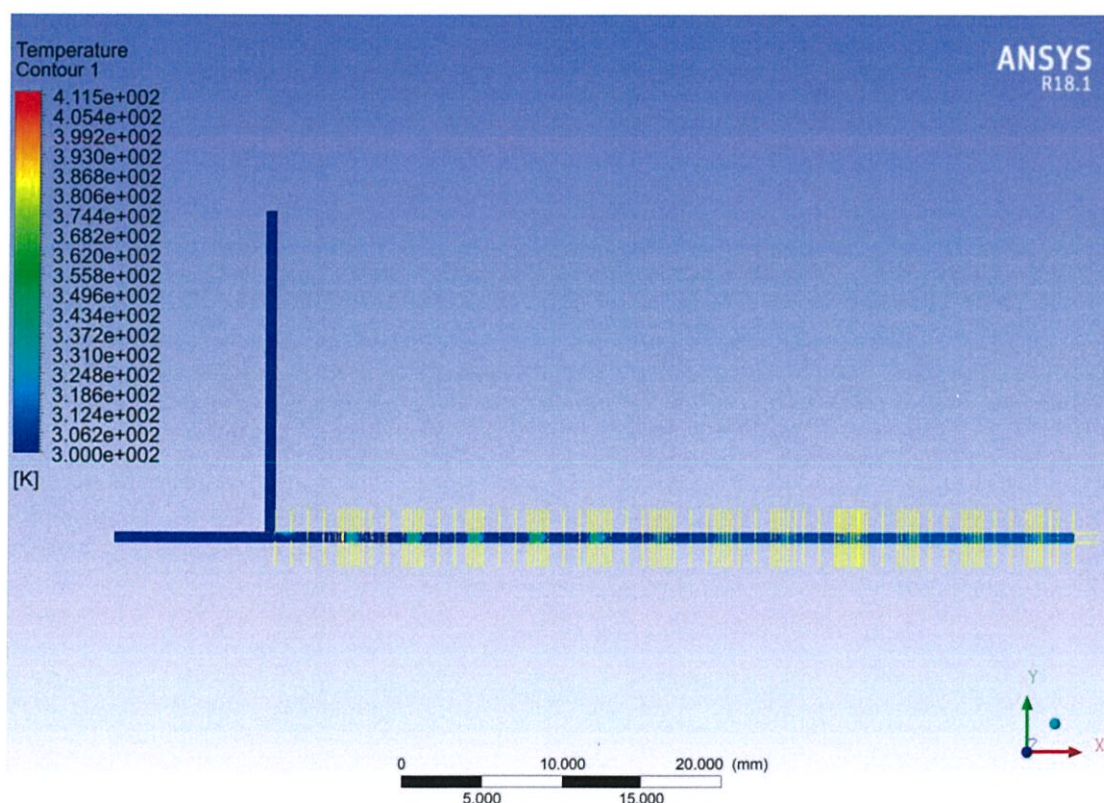


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสถานะเดียว

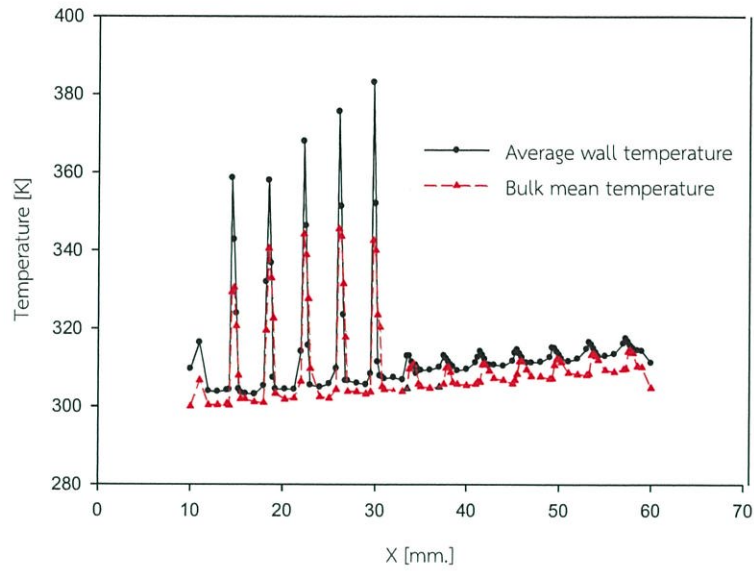
จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขผลที่ได้คือ ที่ความเร็วมากขึ้นส่งผลให้ตัวเลขเรย์โนลด์มากขึ้นตามและจะพบว่าตัวเลขนี้สเกลเฉลี่ยมีแนวโน้มมากขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าที่ Reynolds number ของไหลสถานะเดียวที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ Average Nusselt number ของท่อเพิ่มขึ้นและส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของของไหลจะดีขึ้น

2. ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของไหลสองสถานะ

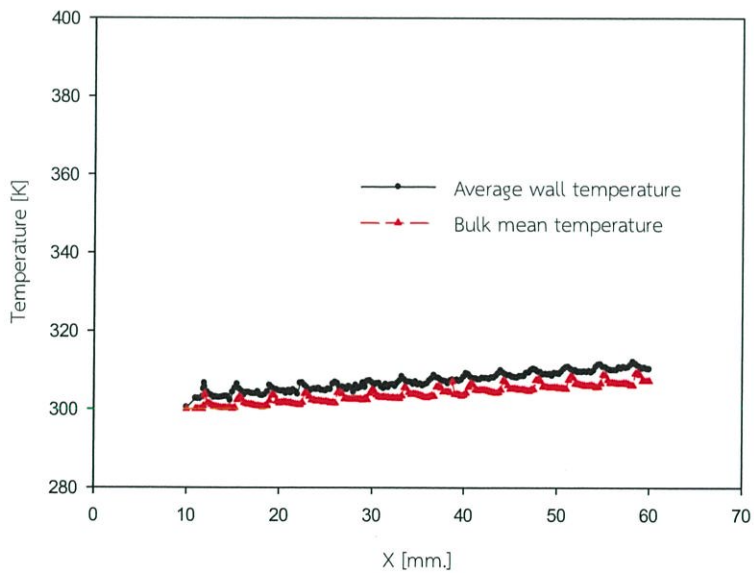
สำหรับสารทำงานที่ใช้วิเคราะห์ คือ น้ำและอากาศ โดยกำหนดให้สารทั้งสองอุณหภูมิเริ่มต้นมีค่า 300 K ซึ่งพิจารณาที่ระยะ $x = 10$ mm. ถึง $x = 60$ mm. ที่ถูกติดตั้งด้วยฟลักซ์ความร้อนขนาด $50,000 \text{ W/m}^2$ เช่นเดียวกันกับการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของไหลสถานะเดียว โดยการพิจารณาจะแบ่งช่วงพิจารณาให้ละเอียดมากกว่าแบบสถานะเดียวเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะมีความผันผวนเนื่องจากเกิดฟองแก๊สในระบบ จึงมีความปั่นป่วนมากกว่าแบบสถานะเดียว โดยแบ่งการวิเคราะห์ตามตำแหน่งดังรูป



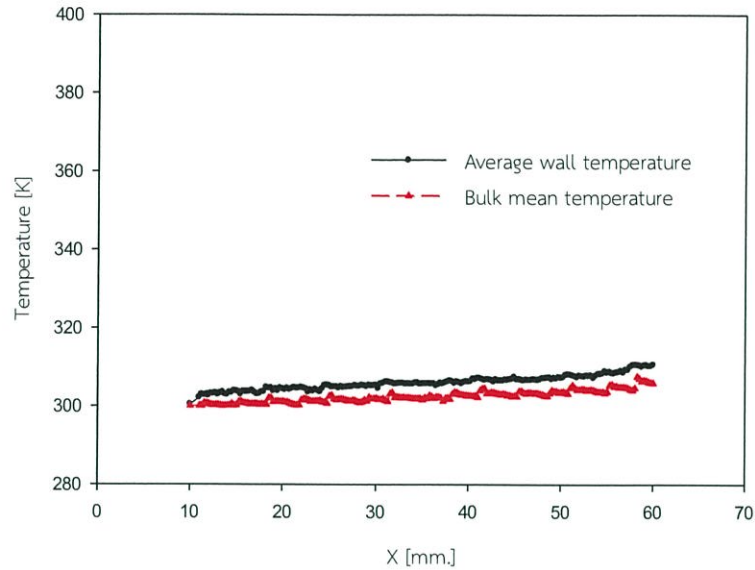
รูปที่ 4.15 แบบจำลองสำหรับการไหลของของไหลสองสถานะที่พิจารณาโดยแบ่งช่วงพิจารณาละเอียดในช่วงที่เกิดฟองแก๊ส



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผนังท่อ กับ bulk mean temperature เทียบกับ ระยะท่อที่ของไหลสองสถานะไหลผ่านที่ความเร็วน้ำ 0.19 m/s



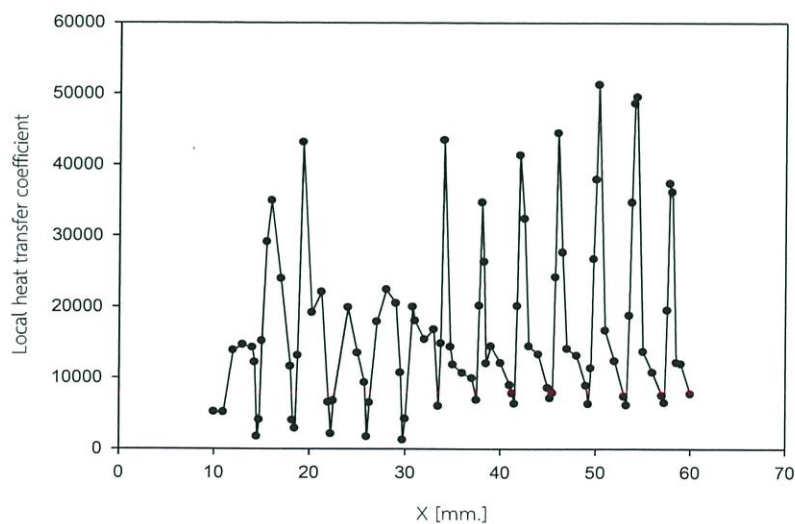
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผนังท่อ กับ bulk mean temperature เทียบกับ ระยะท่อที่ของไหลสองสถานะไหลผ่านที่ความเร็วน้ำ 0.27 m/s



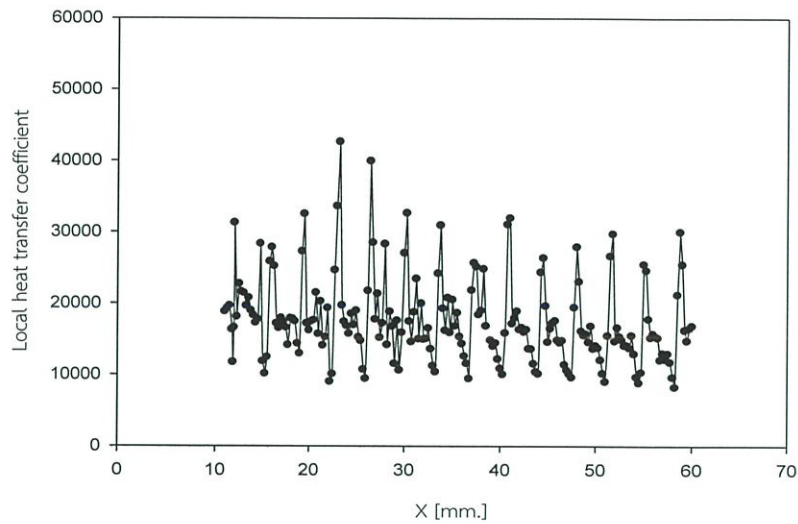
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผนังท่อ กับ bulk mean temperature เทียบกับ ระยะท่อที่ของไหลสองสถานะไหลผ่านที่ความเร็วน้ำ 0.43 m/s

จากผลลัพธ์ bulk mean temperature และอุณหภูมิผนังท่อที่ได้ตามระยะความยาวท่อ x จะพบว่าช่วงฟองแก๊สจะมีค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างผันผวนและช่วงของไหลผสมมีอุณหภูมิ แนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบคงที่ โดยค่าที่ได้สามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากสมการ

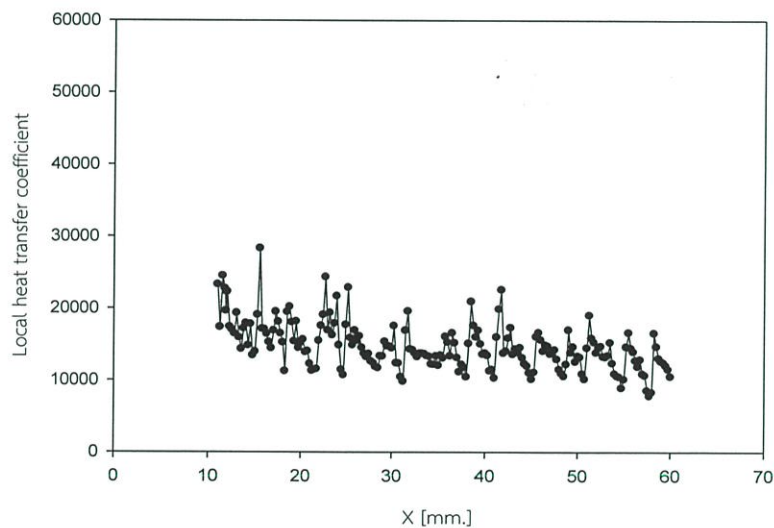
$$h(x) = \frac{q''}{T_{wall}(x) - T_{fluid}(x)} \text{ ได้ผลลัพธ์ดังรูปดังต่อไปนี้}$$



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะ x ต่างๆของท่อที่ ความเร็วน้ำ 0.19 m/s และความเร็วอากาศ 0.07 m/s



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะ x ต่างๆของท่อที่
ความเร็วน้ำ 0.27 m/s และความเร็วอากาศ 0.07 m/s



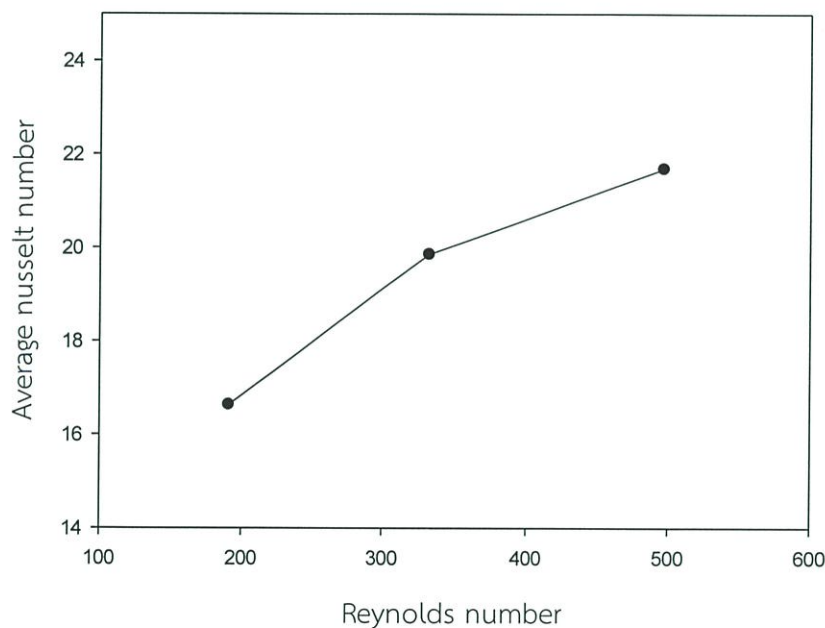
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเทียบที่ระยะ x ต่างๆของท่อ
ที่ความเร็วน้ำ 0.43 m/s และความเร็วอากาศ 0.07 m/s

จากรูปที่ 4.20, 4.21, 4.22 และ 4.23 สามารถนำข้อมูลที่ได้ออกไปหาค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ย (Average Nusselt number) ได้จากสมการ $Nu_{avg} = \frac{h_{avg} D_h}{k}$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยหาได้จากสมการ $h_{avg} = \frac{1}{L_{ch}} \int_0^{L_{ch}} h(x) dx$ ซึ่งค่า $\int_0^{L_{ch}} h(x) dx$ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟช่วงที่ $x = 10$ ถึง $x = 60$ จะได้ค่า ผลลัพธ์ตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 4.4

Reynolds number	Average Nusselt number (Two-phase)
191.21	16.64
332.31	20.26
496.67	21.68

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนี้สเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ

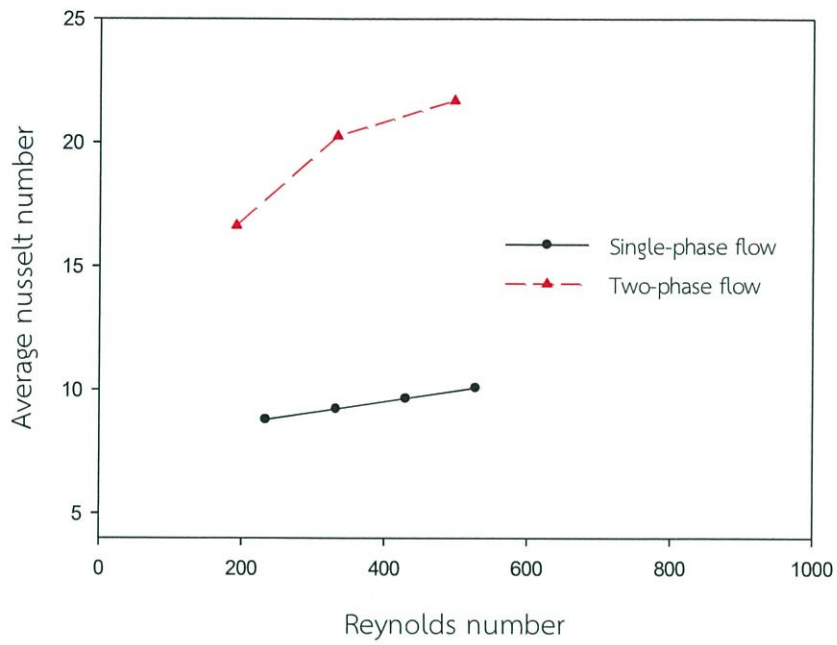
Comparison average nusselt number with Reynolds number
in two-phase



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนี้สเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ

จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนี้สเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ พบว่าตัวเลขนี้สเซลเฉลี่ยมีแนวโน้มมากขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น ในลักษณะคล้ายคลึงกับแนวโน้มการไหลสถานะเดียว แต่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ Average Nusselt number มากกว่าหากเทียบกับกราฟการไหลสถานะเดียว ซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นดังรูปที่ 4.27

Comparison average nusselt number with reynolds number between two-phase flow with single-phase flow



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเซลเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสถานะเดียวและการไหลสองสถานะ

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ การศึกษาคุณลักษณะการไหลและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดยใช้สารทำงานเป็น น้ำ และคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะโดยใช้สารทำงานเป็น น้ำและอากาศ

5.1.1 การศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ

สำหรับการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดยสนใจผลกระทบจากตัวแปรคือ ความเร็วของไหล ซึ่งมีผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับการเพิ่มความเร็วของของไหลทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าตัวเลขนัสเซลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยที่ค่าตัวเลขนัสเซลมีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ถ้าค่าตัวเลขนัสเซลมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดียิ่งขึ้น

5.1.2 การศึกษาคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำและอากาศ

สำหรับการศึกษาคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. รูปแบบการไหลสองสถานะที่ความเร็วน้ำและอากาศแตกต่างกัน จะทำให้ลักษณะการเกิดรูปแบบการไหลแตกต่างกันซึ่งสามารถทำนายรูปแบบการไหลได้ 3 รูปแบบการไหลได้แก่ bubbly flow, slug flow และ elongated slug flow อีกทั้งยังสามารถทำนายความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของรูปแบบการไหลสองสถานะเพื่อประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่างๆให้เหมาะสมกับการใช้งานหรือใช้เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์ได้

2. เมื่อพิจารณาถึงความดันตกสำหรับของไหลสองสถานะที่ความดันระหว่างทางเข้าท่อและทางออกท่อพบว่าที่ความเร็วของอากาศมากขึ้นโดยกำหนดให้ความเร็วของน้ำคงที่ จะมีความดันตกมากขึ้นหากพิจารณาเฉพาะในช่วง bubble flow region

3. สำหรับแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเซลกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์พบว่าค่าตัวเลขนัสเซลเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้นจะมีลักษณะการเพิ่มขึ้นที่คงที่แบบสัมพันธ์กัน

4. เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเซลกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสถานะเดียวและสองสถานะพบว่า ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกันของของไหลสองสถานะมีค่าตัวเลขนัสเซลที่มากกว่าของไหลสถานะเดียวโดยที่ตัวเลขนัสเซลของของไหลสองสถานะมากกว่าสถานะเดียว 107.96 % จึงสามารถสรุปได้ว่าของไหลสองสถานะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าของไหลสถานะเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลทั้งสถานะเดี่ยวและสองสถานะควรเพิ่มความแตกต่างของช่วงความเร็วของสารทำงานที่ทางเข้าท่อให้มากขึ้น เพื่อจะได้เห็นความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละความเร็วที่เปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

บรรณานุกรม

1. Aussillous, P., Quere, D., 2000, "Quick deposition of a fluid on the wall of a tube", **Physics of Fluids**, 12 : 2367–2371.
2. Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992, "A continuum method for modeling surface tension", **Journal of Computational Physics**, 100 : 335–354.
3. Bretherton, F.P., 1961, "The motion of long bubbles in tubes", **Journal of Fluid Mechanics**, 10 : 166–188.
4. Choi, C., Yu, D.I., Kim, M., 2011, "Surface wettability effect on flow pattern and pressure drop in adiabatic two-phase flows in rectangular microchannels with T-junction mixer", **Experimental Thermal and Fluid Science**, 35 : 1086–1096.
5. Desai, S., Subhedar D., 2013, "Hydraulic and Thermal performance of Microchannel", **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, 2231-5381
6. Dobson, M. K. 1994, "Heat Transfer and Flow Regimes During Condensation in Horizontal Tubes", PhD Thesis, University of Illinois.
7. Friedel L. 1979., "Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two phase pipe flow", **European Two Phase Flow Group Meeting**, Paper E2.
8. Gupta, R., Fletcher, D.F., Haynes, B.S., 2009, "On the CFD modeling of Taylor flow in microchannels", **Chemical Engineering Science**, 64 : 2941–2950.
9. John R.T., 2004, **Heat Transfer Engineering Databook III.**, Switzerland.
10. Joseph S. Miller, 2010, **Two Phase Fluid Flow And Heat Transfer.**, University of Wisconsin Madison.
11. Kreutzer, M.T., Kapteijn, F., Moulijn, J.A., Kleijn, C.R., Heiszwolf, J.J., 2005, "Inertial and interfacial effects on pressure drop of Taylor flow in capillaries", **American institute of chemical engineers journal**, 51 : 2428–2440.

12. Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C., 1949, "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes", *Chemical Engineering Progress*, 45 : 39-48
13. Padoina, N., Souzaa, A., Ropelatob, K., Soaresa, C., 2016, "Numerical simulation of isothermal gas-liquid flow patterns in microchannels with varying wettability", *Chemical Engineering Research and Design*, 109 : 698-706.
14. Qian, D., Lawal, A., 2006, "Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel", *Chemical Engineering Science*, 61 : 7609-7625.
15. Serizawa, A., Feng, Z., Kawara, Z., 2002, "Two-phase flow in microchannels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26 : 703-714.
16. Triplett, K.A., Ghiaasiaan, S.M., Abdel-Khalik, S.I., Sadowski, D.L., 1999. "Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part 1: two-phase flow patterns", *International Journal of Multiphase Flow*, 25 : 377-394.
17. สิทธิกานต์ นุ่นหนู. 2551. การจำลองสนามการไหลของอนุภาคของไหลภายในเครื่องแยกละเอียดแบบแผ่นคลื่น. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
18. R. Gupta, D.F. Fletcher, B.S. Haynes, "CFD modeling of flow and heat transfer In the Taylor flow regime", *Chemical Engineering Science* 65 (2010) 2094-2107
19. Adam Neale¹, Dominique Derome¹, Bert Blocken and Jan Carmeliet, "CFD calculation of convective heat transfer coefficients and validation – Part I:Laminar flow", Annex 41 – Kyoto, April 3rd to 5th, 2006
20. Amirah M. Sahar, Jan Wissink, Mohamed M. Mahmoud, Tassos G. Karayiannis, Mohamad S. Ashrul Ishak, "Effect of hydraulic diameter and aspect ratio on single phase flow and heat transfer in a rectangular microchannel", *Applied Thermal Engineering* 115 (2017) 793-814.