

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อน  
ในท่อคลื่นขนาดเล็ก

NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER  
IN WAVY MICROCHANNEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER  
IN WAVY MICROCHANNEL



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

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นขนาดเล็ก

นายกันต์พงษ์ นิธิอนันต์กร	59010080
นางสาวศิริดา วงษ์บุญ	59011290
นางสาวภัศราภรณ์ อ่ำปิยะ	59011615
ผศ.ดร.มธุรส สุชาติระวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสองสถานะเดี่ยวโดยใช้น้ำ และการไหลสองสถานะโดยใช้น้ำ-ไนโตรเจน และน้ำ-อากาศ เป็นของไหลภายในท่อคลื่นขนาดเล็ก แบบจำลองท่อคลื่นทำจากทองแดงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.507 mm พลิกซ์ความร้อนคงที่ที่ผิวด้านล่างเท่ากับ  $100 \text{ W/cm}^2$  ท่อคลื่นจำลองนี้ออกแบบโดยใช้ AutoCAD และทำการจำลองโดยใช้ ANSYS สำหรับการไหลสองสถานะเดี่ยวของน้ำ พบว่าการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นมีค่ามากกว่าท่อตรงเมื่อมีตัวเลขเรย์โนลด์ส์เท่ากัน เนื่องจากท่อคลื่นมีโครงสร้างที่เพิ่มความปั่นป่วน เมื่อสารทำงานเคลื่อนที่ไปตามส่วนโค้งทำให้เกิดแรงเหวี่ยงและเกิดการผสมกันของของไหลที่ผนังท่อ ดังนั้นจึงมีการกระจายความร้อนที่ดีกว่าท่อตรงและมีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อท่อคลื่นมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นพบว่าท่อที่มีแอมพลิจูดสูงมีการถ่ายเทความร้อนมากกว่าแอมพลิจูดต่ำ เนื่องจากแรงเหวี่ยงที่มากขึ้นทำให้การผสมกันมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อศึกษาผลกระทบของการไหลสองสถานะ พบว่าการไหลแบบ slug flow ทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งฟองอากาศมีการหมุนเวียนของมวลภายใน ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนในแนวรัศมีดีขึ้นจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะดีกว่าสถานะเดี่ยว ยังพบว่าเมื่อเปลี่ยนสารทำงานจากน้ำ-ไนโตรเจนเป็นน้ำ-อากาศ มีการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษากการไหลสองสถานะในท่อคลื่น พบว่ามีดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าการไหลสองสถานะในท่อตรง การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตจึงควรเพิ่มความเร็วของสารทำงานเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

# NUMERICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER IN WAVY MICROCHANNEL

Kanphong Nitianunkorn 59010080  
Sirada Wongbun 59011290  
Phatsaraphon Ampiya 59011615  
Asst.Prof.Dr.Maturose Suchatawat Advisor  
Year 2019

## ABSTRACT

This project presents numerical study of single-phase water flow and two-phase flow of water-nitrogen and water-air in wavy microchannel. The microchannels simulated are made of copper. The hydraulic diameter is 0.507mm. A constant heat flux of  $100 \text{ W/cm}^2$  is applied through the bottom surface of the microchannel. The microchannel model is designed using AutoCAD and simulation of the flow is performed using ANSYS. For water single-phase flow, it is found that rate of heat transfer in wavy microchannel is higher than that of the straight microchannel at the same Reynolds number. When the working fluid moves along the curve, it causes the centrifugal force leads to the mixing of the fluid. Better heat dissipation and heat transfer than straight microchannel. Moreover, when the wavy microchannel has more amplitude found that high amplitude has more heat transfer than low amplitude due to the greater centrifugal force leads to more mixing as well. When studying the effects of two-phase flow, it was found that slug flow and circulation inside the bubbles increase the radial heat transfer. Therefore the heat transfer of the two-phase flow better than single phase flow. Also found that when changing working fluid from water-nitrogen to water-air have similar average heat transfer coefficient. However, according to the results of the study of two phase flow in the wavy microchannel found that the performance index is less than the two phase flow in the straight microchannel. Further studies should increase the speed of the working fluid in order to analyze the trend of the performance index.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และเป็นผู้ตรวจทานต้นฉบับวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ยืมใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองการศึกษาเชิงตัวเลข

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดามารดา ที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ มีคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น

นายกันต์พงษ์ นิธิอนันต์กร  
นางสาวศิรดา วงษ์บุญ  
นางสาวภัศราภรณ์ อ่ำปิยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และด้อยค่าอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.4.1 การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นขนาดเล็ก.....	2
1.4.2 การไหลของของไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นขนาดเล็ก... ..	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว.....	6
2.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของของไหลสถานะเดียว.....	6
2.1.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว.....	7
2.2 การไหลของของไหลสองสถานะ.....	8
2.2.1 รูปแบบการไหล.....	8
2.2.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะ.....	10
2.3 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	11
2.3.1 สมการควบคุม.....	12
2.3.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน.....	18
2.3.3 ปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็ว.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	23
3.1 การเลือกขนาดกริดที่เหมาะสม ของของไหลสองสถานะ.....	23
3.1.1 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบผล.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การแบ่งกริดที่ใช้ในการจำลอง .....	24
3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง.....	26
3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง .....	36
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	38
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย.....	51
4.1 การไหลของของไหลในท่อตรง.....	51
4.1.1 รูปแบบการไหลในท่อตรง.....	51
4.1.2 การพาความร้อนของของไหลในท่อตรง .....	52
4.1.3 ความดันของของไหลในท่อตรง .....	55
4.2 การไหลของของไหลในท่อกว้าง.....	58
4.2.1 รูปแบบการไหลในท่อกว้าง .....	58
4.2.2 การพาความร้อนของของไหลในท่อกว้าง .....	59
4.2.3 ความดันของของไหลในท่อกว้าง .....	62
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	66
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
บรรณานุกรม.....	67

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงรูปแบบการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน.....	15
3.1 แสดงขนาดของตัวแปรในรูปที่ 3.1.....	24
3.2 แสดงผลการทดลองของ Choi et al. ที่ความเร็วน้ำ ( $V_l$ ) 0.25 m/s .....	35
3.3 แสดงผลการจำลองที่ความเร็วน้ำ ( $V_l$ ) 0.25 m/s ความเร็วไนโตรเจน ( $V_g$ ) 0.07 m/s.....	35
3.4 แสดงผลการจำลองที่ความเร็วน้ำ ( $V_l$ ) 0.25 m/s ความเร็วไนโตรเจน ( $V_g$ ) 0.65 m/s.....	35
3.5 แสดงแบบจำลองที่ทำการศึกษา.....	38
3.6 แสดงขนาดของตัวแปรในรูปที่ 3.24 .....	39
4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของแบบจำลองในหน่วย $W/cm^2 \cdot K$ .....	61
4.2 แสดงค่าความดันตกของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาในหน่วย kPa .....	64
4.3 แสดงดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน(PI) ของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา .....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการผสมกันของของไหลในท่อคลื่นในการศึกษาของ Solehati et al.....	3
1.2 แสดงประสิทธิภาพโดยรวมเมื่อเทียบกับตัวเลขเรย์โนลด์ ในการศึกษาของ Gong et al. ....	3
1.3 แสดงมุมของของไหลที่ทำกับพื้นผิวสัมผัสในการศึกษาของ Choi et al.....	4
1.4 แสดงความแตกต่างของรูปแบบการไหลในท่อคลื่น ในการศึกษาของ Doaa el at.....	5
2.1 แสดงตัวแปรของแบบจำลอง .....	7
2.2 แสดงรูปแบบการไหล น้ำ – ไนโตรเจน (a) Bubble Flow, (b) Slug Flow, (c) Liquid ring flow และ (d) Stratified Flow จากงานวิจัยของ Choi et al.....	9
2.3 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE .....	21
2.4 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ PISO โดย กิรติ .....	22
3.1 แสดงขนาดแบบจำลองของของไหลสองสถานะในท่อตรง.....	23
3.2 แสดงแบบจำลองของของไหลสองสถานะในท่อตรง .....	24
3.3 แสดงการตั้งค่ากริด.....	25
3.4 แสดงส่วนต่างๆของท่อตรง .....	25
3.5 แสดงการตั้งค่าทั่วไป.....	26
3.6 แสดงการตั้งค่าแบบจำลองสองสถานะ.....	27
3.7 แสดงการตั้งค่าแบบจำลองความปั่นป่วน .....	28
3.8 แสดงการตั้งค่าสถานะของของไหลสองสถานะ .....	28
3.9 แสดงการตั้งค่าสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวและมุมที่ผิวสัมผัสของไหล .....	29
3.10 แสดงการตั้งค่าที่ทางเข้าไนโตรเจน .....	29
3.11 แสดงการตั้งค่าที่ทางเข้าน้ำ.....	30
3.12 แสดงการตั้งค่าที่สถานะน้ำของทางเข้าไนโตรเจนและน้ำ.....	30
3.13 แสดงการตั้งค่ามุมผิวสัมผัส.....	31
3.14 แสดงการตั้งค่าฟลักซ์ความร้อน .....	31
3.15 แสดงการหาผลเฉลยความดันและความเร็ว .....	32
3.16 แสดงการตั้งค่า Residual.....	32
3.17 แสดงการสมมุติค่าตอบเริ่มต้น .....	33
3.18 แสดงการตั้งค่า Patch.....	33
3.19 แสดงการตั้งค่าในหัวข้อ Run Calculation.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 แสดงการตั้งค่า Variable Time Step Settings .....	34
3.21 แสดงกราฟความดันตกสำหรับการไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อสี่เหลี่ยม .....	37
3.22 แสดงกราฟความยาวฟองอากาศสำหรับการไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อสี่เหลี่ยม .....	37
3.23 แสดงส่วนต่างๆของท่อคลื่น .....	38
3.24 แสดงขนาดของแบบจำลองของของไหลสองสถานะในท่อคลื่น29 .....	39
3.25 แสดงตำแหน่งการวัดแอมพลิจูด .....	39
4.1 แสดงรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อตรง .....	51
4.2 แสดงรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อตรงด้านบน .....	52
4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ในท่อตรง .....	53
4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ระหว่างตำแหน่ง $x/L$ ที่ 0.582-0.609 .....	54
4.5 แสดงสัดส่วนปริมาตรของไนโตรเจนระหว่างตำแหน่ง $x/L$ ที่ 0.582-0.609 .....	54
4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำ ในท่อตรง .....	55
4.7 แสดงการกระจายความดันของของไหลตามระยะทาง $x/L$ ในท่อตรง .....	56
4.8 แสดงการกระจายความดันของของไหลระหว่างตำแหน่ง $x/L$ ที่ 0.582-0.609 .....	57
4.9 แสดงสัดส่วนปริมาตรของไนโตรเจนระหว่างตำแหน่ง $x/L$ ที่ 0.582-0.609 .....	57
4.10 แสดงการกระจายความดันของของไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำในท่อตรง .....	58
4.11 แสดงรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1 mm .....	59
4.12 แสดงรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.15 mm .....	59
4.13 แสดงรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.2 mm .....	59
4.14 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1 mm .....	59
4.15 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.15 mm .....	59
4.16 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.2 mm .....	59
4.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการไหลสถานะเดียวในท่อคลื่น .....	60
4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำ .....	60
4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ในท่อคลื่น .....	61
4.20 แสดงการกระจายความดันของการไหลสถานะเดียวตามระยะทาง $x/L$ ในท่อคลื่น .....	62
4.21 แสดงการกระจายความดันของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่น .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัด VIII ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.22 แสดงการกระจายความดันของของไหลสองสถานะตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อคลื่น ..... 63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด X อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	แอมพลิจูด, mm
$A_c$	พื้นที่หน้าตัดของท่อ, $m^2$
$C_p$	ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล, $J/kg \cdot K$
$D_h$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก, m
f	ตัวประกอบแรงเสียดทาน
G	ฟลักซ์เชิงมวล, $kg \cdot m/s$
h	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
$k_l$	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของเหลว, $W/m \cdot K$
L	ความยาวท่อ, m
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล, $kg/s$
P	เส้นรอบรูปหน้าตัดท่อ, m
PI	ดัชนีวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
$q''$	ฟลักซ์ความร้อน, $W/m^2$
$Re_{tp}$	ตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะ
T	อุณหภูมิของไหล, K
u	ความเร็วของไหล, m/s
X	คุณภาพเชิงไอ
$\mu_{tp}$	สัมประสิทธิ์ความหนืดพลวัตของไหลสองสถานะ, $N \cdot s/m^2$
$\rho_{tp}$	ความหนาแน่นของไหลสองสถานะ, $kg/m^3$
$\alpha_g$	สัดส่วนปริมาตรของสถานะแก๊ส
$\alpha_l$	สัดส่วนปริมาตรของสถานะของเหลว
$\sigma$	แรงตึงผิวระหว่างรอยต่อของทั้งสองสถานะ, $N/m$
$\theta_w$	มุมผิวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัด X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีการพัฒนาให้มีกำลังและประสิทธิภาพที่ดี มีความสามารถในการทำงานที่สูงและซับซ้อนขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้อุปกรณ์ทำงานได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่มากขึ้นด้วย ถ้าหากการระบายความร้อนไม่เหมาะสมเท่าที่ควร จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานและอายุการใช้งานลดลง การใช้ไมโครเซนแนลโดยให้ของไหล ไหลผ่านในช่องคลื่อนั้นเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของ อุปกรณ์ ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและทดลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของไมโครเซนแนลในหลายๆ ด้าน เช่น การเปลี่ยนสารทำงานจากสถานะเดียวให้มีสองสถานะ การเปลี่ยนชนิดของสารทำงาน การ เปลี่ยนหน้าตัดท่อให้เป็นรูปร่างเรขาคณิตต่างๆ การเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงตัวของท่อ การปรับอัตราการไหลของการทำงาน เป็นต้น ซึ่งสิ่งที่คาดหวังจากการออกแบบในการพัฒนาอุปกรณ์ ระบายความร้อน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด และค่าความดันตกที่ต่ำที่สุด จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การไหลของของไหลในท่อไมโครเซนแนลที่มีรูปร่างเป็นท่อรูปคลื่น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อไมโครเซนแนลที่มีรูปร่างเป็นท่อตรง[1] และการไหล แบบสองสถานะ(น้ำ-อากาศ) มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลแบบสถานะเดียวใน ท่อไมโครเซนแนลแบบเดียวกัน[4,11] ในการศึกษา รูปแบบการไหลของของไหลในท่อไมโครเซนแนล มีหลายวิธี เช่น การทดลอง(Experimental method) และ การศึกษาเชิงตัวเลข(Numerical method) อย่างไรก็ตาม การศึกษาด้วยการทดลองอาจมีความซับซ้อนและยุ่งยากกว่าซึ่งต่างจาก การศึกษาเชิงตัวเลขที่มีความสะดวกและรวดเร็วกว่า

การศึกษานี้จึงเป็นการศึกษาเชิงตัวเลข ซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น สามารถวิเคราะห์ ถึงกลไกที่ซับซ้อนของการไหล ซึ่งวิธีทำการทดลองนั้นอาจจะศึกษาได้ยาก นอกจากนี้การทำการ ทดลองยังมีข้อจำกัดของเครื่องมือ ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาปัญหาเกี่ยวกับ การไหลของของไหลจะช่วยแก้ปัญหาที่เกิดจากการทดลองได้อย่างดี ในศึกษานี้ทำการจำลอง การไหลสถานะเดียวและแบบสองสถานะ(น้ำ-อากาศและน้ำ-ไนโตรเจน) ในไมโครเซนแนลตรงและ แบบคลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm โดยกำหนดให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อน เท่ากันทุกแบบจำลอง ไมโครเซนแนลมีหน้าตัดกว้าง 0.617 mm สูง 0.43 mm ซึ่งข้อมูลที่ได้จาก การศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาและพัฒนาให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของไม

โครเซนแนลดีขึ้นต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและความดันตกที่เกิดขึ้นสำหรับการไหลสถานะเดียวและการไหลสองสถานะแบบไม่มีการเดือดในไมโครแชนแนลตรงและไมโครแชนแนลคลื่น
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและความดันตกเมื่อแอมพิจูดของไมโครแชนแนลคลื่นเท่ากับ 0.1, 0.15 และ 0.2 mm
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและความดันตกที่เกิดขึ้นสำหรับการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำและการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ

## 1.3 ขอบเขตปริญญาณิพนธ์

1. เป็นการศึกษาเชิงตัวเลข
2. กำหนดไมโครแชนแนลทำจากทองแดง หน้าตัดกว้าง 0.617 mm สูง 0.43 mm.
3. การไหลสองสถานะแบบไม่มีการเดือด

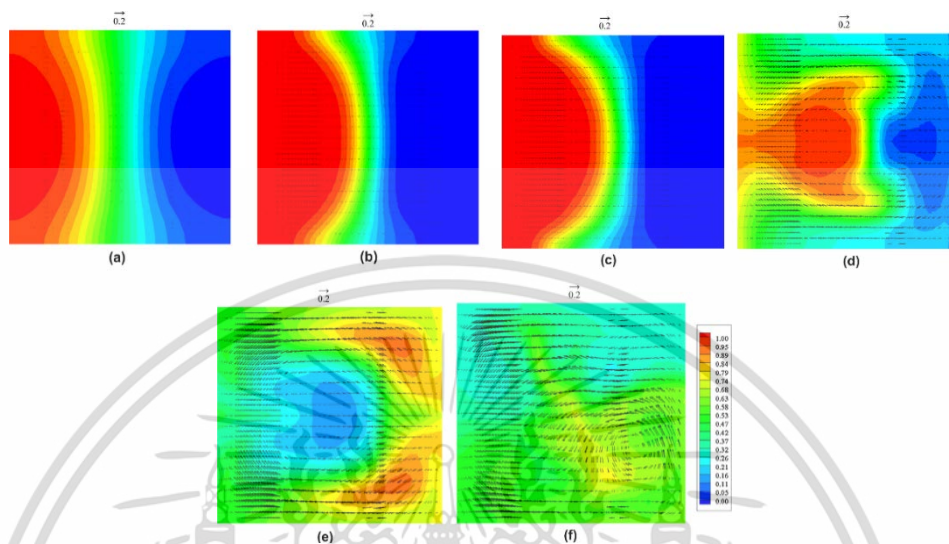
## 1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.4.1 การไหลของของไหลสถานะเดียวและการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นขนาดเล็ก

Mohammad et al. [9] ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบและการพาความร้อนแบบบังคับในท่อตรงและท่อคลื่นโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน พบว่าการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นมีค่าสูงกว่าท่อตรงที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเท่ากัน เนื่องจากท่อคลื่นมีพื้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งช่วยในการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้นและด้วยโครงสร้างรูปคลื่นทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเกิดการผสมของของไหลที่ส่วนโค้งทำให้การผสมกันของเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้การกระจายความร้อนดีขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น พบว่าความดันตกและการถ่ายเทความร้อนก็เพิ่มขึ้นด้วย

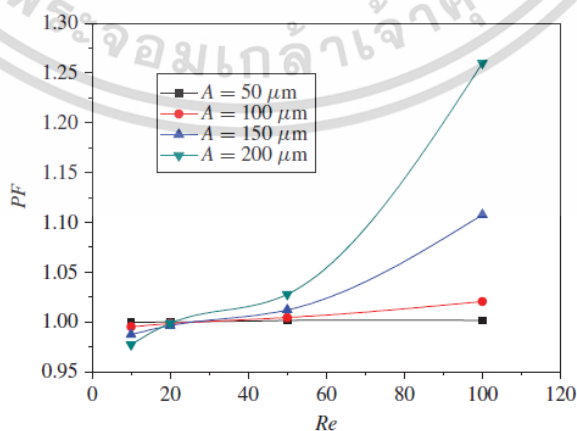
Solehati et al. [10] ได้การศึกษาเชิงตัวเลขในการตรวจสอบประสิทธิภาพการผสมของสารทำงาน A และ B โดยใช้ท่อขนาดเล็กสองแบบในการจำลอง นั่นคือท่อคลื่นที่มีทางเข้ารูปตัวที และท่อตรงที่มีทางเข้ารูปตัวที จากผลการจำลองพบว่าท่อคลื่นมีค่าดัชนีการผสมและประสิทธิภาพที่มากกว่าท่อตรง เนื่องจากกระแสการไหลที่สอง ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยโครงสร้างท่อรูปคลื่น ในรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงการผสมกันที่ระยะ  $x$  โดย a)  $Re = 1$  b)  $Re = 5$  c)  $Re = 10$  d)  $Re = 50$  e)  $Re = 100$  f)  $Re = 200$  จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์และ

แอมพลิจูดของท่อคลื่นสูงขึ้นทำให้การผสมกันดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ประสิทธิภาพการผสมกลับน้อยลง เนื่องจากความดันตกที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.1 แสดงการผสมกันของของไหลในท่อคลื่นในการศึกษาของ Solehati et al.

Gong et al. [7] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของแบบจำลองท่อคลื่นกับท่อตรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก  $500 \mu\text{m}$  โดยสารทำงานเป็นน้ำ พบว่าท่อคลื่นที่แอมพลิจูดสูงมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่ำ แต่เมื่อคำนวณประสิทธิภาพโดยรวมพบว่าในการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำเช่นกัน เนื่องจากความดันตกที่เพิ่มขึ้นมากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูง ประสิทธิภาพโดยรวมก็สูงขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าท่อคลื่นเหมาะสำหรับการใช้ในการไหลที่มีตัวเลขเรย์โนลด์สูง



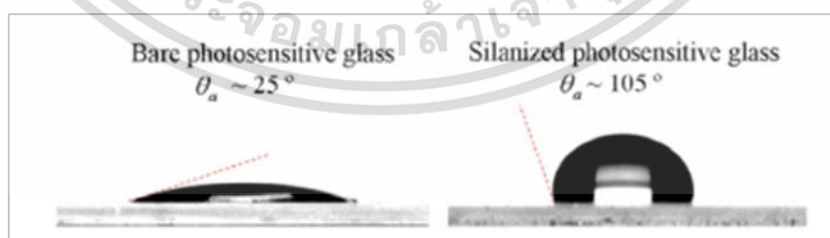
รูปที่ 1.2 แสดงประสิทธิภาพโดยรวมเมื่อเทียบกับตัวเลขเรย์โนลด์ ในการศึกษาของ Gong et al.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4.2 การไหลสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นและท่อตรงขนาดเล็ก

Mehdizadeh et al. [1] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะอากาศ-น้ำในท่อขนาดเล็กโดยใช้วิธี Volume-of-Fluid (VOF) ในการจำลองการไหลแบบ slug flow ในท่อขนาดเล็กที่ให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของ slug flow ถูกเปรียบเทียบกับใน Poiseuille flow และ Plug flow พบว่าการรวมกันของแก๊สและของเหลวบริเวณชั้นฟิล์มส่งผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนโดยรวมมากถึง 20% เมื่อเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซิลท์พบว่า Poiseuille flow มีค่าสูงถึง 610% เมื่อเทียบกับ Plug flow ในงานวิจัยนี้ยังสามารถตรวจจับความผันผวนของตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันตั้งแต่ 3 ถึง 100 ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและความยาวของฟองอากาศ ผลการค้นพบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางเคมีขนาดเล็กและเครื่องจักรกล

Choi et al. [3] ได้ศึกษาความสามารถในการกระจายตัวของของไหลสองสถานะในโตรเจน-น้ำในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กโดยใช้พื้นผิวสองชนิดในการทดลอง เพื่อศึกษารูปแบบการไหลและความดันตกที่เกิดขึ้น พื้นผิวชนิดแรกเป็นพื้นผิวแบบไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) ซึ่งวัดมุมของของไหลที่ทำกับพื้นผิวได้ 25 องศา พื้นผิวชนิดสองเป็นพื้นผิวแบบไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) วัดมุมของของไหลได้ 105 องศา ดังรูปที่ 1.2 จากผลการทดลองพื้นผิวแบบไฮโดรฟิลิกเกิด รูปแบบการไหลแบบ bubble, elongated bubble และ liquid ring flow เป็นส่วนใหญ่ และพื้นผิวแบบไฮโดรโฟบิก เกิดการไหลแบบ stratified เป็นส่วนใหญ่ เมื่อเทียบที่อัตราการไหลเท่ากันความดันตกในพื้นที่ผิวแบบไฮโดรฟิลิกมีมากกว่าแบบไฮโดรโฟบิก เนื่องจากการไหลแบบ liquid ring flow มีความปั่นป่วนมากกว่าการไหลแบบ stratified จึงทำให้สูญเสียความดันมากกว่า



รูปที่ 1.3 แสดงมุมของของไหลที่ทำกับพื้นผิวสัมผัสในการศึกษาของ Choi et al.

Doaa et al. [4] ทำการทดลองเพื่อศึกษาการไหลแบบสองสถานะ(น้ำและอากาศ) ในท่อไมโครชานแนลรูปคลื่นเปรียบเทียบกับท่อตรงในแนวตั้งและแนวนอน โดยกำหนดความเร็วน้ำมีค่าระหว่าง  $29.1 \text{ cm}^3/\text{min}$  ถึง  $218 \text{ cm}^3/\text{min}$  และความเร็วอากาศมีค่าระหว่าง  $313.3 \text{ cm}^3/\text{min}$  ถึง  $2350 \text{ cm}^3/\text{min}$  พบรูปแบบการไหล 7 รูปแบบ คือ annular flow, bubble flow, churn(semi-annular) flow, plug flow, slug flow, stratified flow, และ wavy flow โดยสังเกตได้ว่า stratified flow เกิดขึ้นเมื่อน้ำและอากาศมีความเร็วต่ำ เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วของน้ำต่ำจะทำให้เกิดการไหลแบบ wavy flow เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศอีกจะทำให้เกิดการไหลแบบ annular flow กรณีความเร็วอากาศต่ำและความเร็วน้ำสูงทำให้เกิดการไหลแบบ slug flow ถ้าความเร็วของน้ำยังคงเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการไหลแบบ bubble flow รูปแบบการไหลที่แตกต่างกันระหว่างท่อตรงแนวนอนกับท่อคลื่นแนวนอนสามารถอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติของรูปแบบการปั่นป่วน รูปแบบการไหลแบบ churn flow ในท่อตรงแนวตั้งเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศและน้ำที่ต่ำ แต่ในท่อคลื่นเกิดที่ความเร็วของอากาศและน้ำที่สูง ด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาคุณสมบัติของท่อคลื่นในแนวตั้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยผลโมเมนตัมและการเปลี่ยนทิศทางการไหล การไหลในทางโค้งจะทำให้สูญเสียโมเมนตัม โดยเฉพาะการไหลในทางโค้งขึ้น โดยอธิบายได้จากแรงโน้มถ่วงและแรงเฉื่อยมีผลต่อรูปแบบการไหล แรงโน้มถ่วงพยายามแบ่งชั้นอากาศและน้ำ ในขณะที่แรงเฉื่อยพยายามรักษาสภาพ และต่อต้านการแบ่งชั้นของอากาศและน้ำ แรงทั้งสองต่อต้านกันจึงเกิดความปั่นป่วนในการไหล



รูปที่ 1.4 แสดงความแตกต่างของรูปแบบการไหลในท่อคลื่น ในการศึกษาของ Doaa et al.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การไหลของของไหลสถานะเดียว (Single-phase flow)

#### 2.1.1 การจำแนกรูปแบบการไหลของของไหลสถานะเดียว

การจำแนกรูปแบบการไหลของของไหลสถานะเดียวใช้ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ในการพิจารณา สามารถนิยามได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล

$u$  คือ ความเร็วของของไหล

$\mu$  คือ ความหนืดพลวัตของของไหล

$D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม

ตัวเลขเรย์โนลด์เป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้อธิบายลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อ สามารถแบ่งลักษณะการไหลได้สองรูปแบบ คือการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โดยเกณฑ์การแบ่งมีดังต่อไปนี้

$Re < 2300$  เป็นรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ

$2300 \leq Re \leq 4000$  เป็นช่วงเปลี่ยนผ่านลักษณะการไหล

$Re > 4000$  เป็นรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน

สมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกสำหรับแบบจำลอง เป็นดังสมการที่ 2.2

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{2(a \times b)}{a + b} \quad (2.2)$$

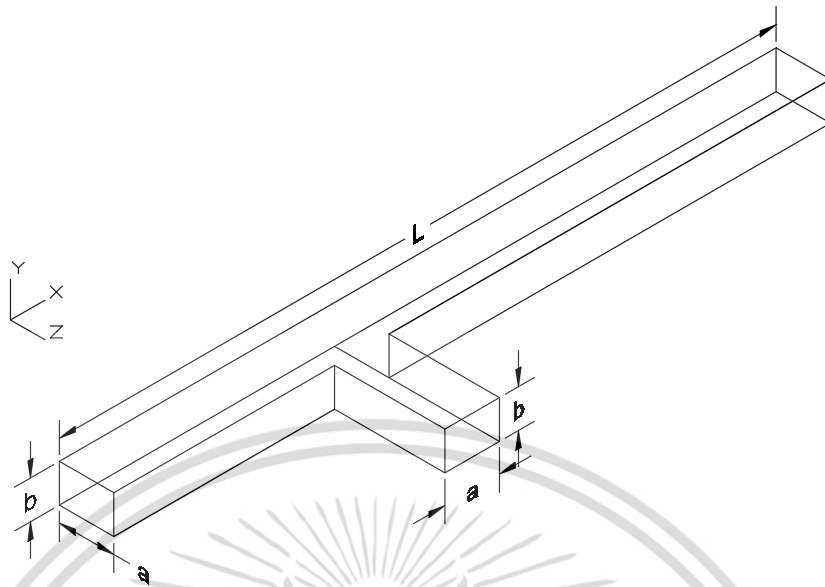
เมื่อ  $A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ นิยามได้จาก  $A_c = a \times b$  ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1

$P$  คือ เส้นรอบรูปของพื้นที่เปียก

$a$  คือ ความกว้างของท่อ

$b$  คือ ความสูงของท่อ

ในรูปที่ 2.1 แสดงตัวแปร  $a$  และ  $b$  ในสมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกสำหรับแบบจำลอง



รูปที่ 2.1 แสดงตัวแปรของแบบจำลอง

การคำนวณความดันตกที่เกิดขึ้นภายในท่อเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = f \frac{L \rho u^2}{2D_h} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\Delta P$  คือ ความดันตก  
 $f$  คือ ตัวประกอบความเสียดทาน  
 $L$  คือ ความยาวของท่อ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1

### 2.1.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$h(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_b(x)} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $h(x)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะ  $x$   
 $q''$  คือ ฟลักซ์ความร้อน  
 $T_w(x)$  คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อที่ระยะ  $x$   
 $T_b(x)$  คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลในพื้นที่หน้าตัดที่ระยะ  $x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_b(x)$  หรือที่เรียกว่า Bulk mean temperature คำนวณได้จากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลในพื้นที่หน้าตัดที่ระยะ  $x$  ใดๆ นิยามได้โดยสมการต่อไปนี้

$$T_b(x) = \frac{\int_{A_c} \rho u C_p T dA_c}{\int_{A_c} \rho u C_p dA_c} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $C_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล  
 $T$  คือ อุณหภูมิของของไหล

$$h_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) dx \quad (2.6)$$

เมื่อ  $h_{avg}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย

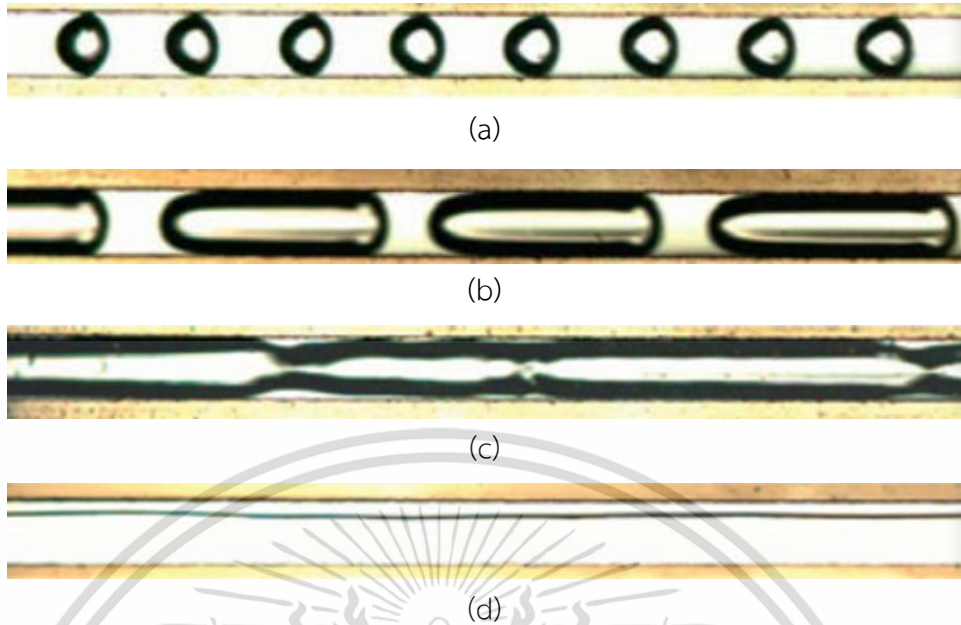
## 2.2 การไหลของของไหลสองสถานะ (Two-phase flow)

### 2.2.1 การจำแนกรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ

รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะได้ถูกเสนอชื่อและเกณฑ์การจำแนกที่แตกต่างกัน เช่น ในงานวิจัยของ Choi et al. [3] ได้จำแนกการไหลแบบ Bubble flow และ Elongated bubble flow แยกจากกัน แต่งานวิจัยของ Pansunee [11] ได้เสนอให้รูปแบบการไหลแบบ Bubble flow, Slug flow, Plug flow ให้ใช้เป็นชื่อเดียวกันคือ Segmented flow ในงานวิจัยนี้จึงได้รวบรวมข้อสรุปและหลักเกณฑ์คร่าวๆ ในการจำแนก ให้เข้าใจเป็นแนวทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.2 สามารถแบ่งการไหลได้เป็น 4 รูปแบบ ดังนี้

1. Bubble flow มีลักษณะการไหลเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก มีความยาวฟองอากาศน้อยกว่าความกว้างท่อ โดยเกณฑ์การจำแนกนี้มาจากงานวิจัยของ Ganapathy [6]
2. Slug flow มีลักษณะการไหลเป็นฟองอากาศคล้ายกับการไหลแบบ Bubble flow เพียงแต่ความยาวฟองอากาศมากกว่าความกว้างท่อ
3. Liquid ring flow มีลักษณะการไหลแบบแยกกันของอากาศและน้ำ โดยอากาศจะรวมตัวกันอยู่ตรงกลาง และมีน้ำล้อมรอบ การไหลลักษณะนี้ในงานวิจัยอื่นๆ มีชื่อเรียกว่า Ring flow, Slug-annular flow, Slug-ring flow เป็นต้น
4. Stratified flow มีลักษณะการไหลแบบแยกชั้นกันอย่างชัดเจนของอากาศและน้ำโดยอากาศไหลอยู่ด้านบน และน้ำอยู่ด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการไหล น้ำ – ไนโตรเจน (a) Bubble Flow, (b) Slug Flow, (c) Liquid ring flow และ (d) Stratified Flow จากงานวิจัยของ Choi et al.

สำหรับแบบจำลองการไหลของของไหลสองสถานะ มีแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับคือแบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous flow model) และแบบจำลองการไหลแบบแยกส่วน (Separated flow model) ในงานวิจัยของ Pansunee [11] ได้เสนอให้ใช้แบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียวกัน ในการทำนายสัดส่วนช่องว่างและความดันตกในรูปแบบการไหลแบบ Bubble flow และ Slug flow

การคำนวณความหนาแน่นของของไหลสองสถานะ สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ  $\rho_{tp}$  คือ ความหนาแน่นของของไหลสองสถานะ

$x$  คือ คุณภาพเชิงไอ

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของไหลสถานะแก๊ส

$\rho_l$  คือ ความหนาแน่นของไหลสถานะของเหลว

งานวิจัยของ Pansunee [11] ยังได้เปรียบเทียบสมการความหนืดพลวัตของของไหลสองสถานะ จากงานวิจัยอื่นๆด้วยเช่นกัน ในการศึกษาพบว่าสมการความหนืดพลวัตของ

Awad and Muzychka [8] สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าสมการอื่นๆ เมื่อรูปแบบการไหลเป็นแบบ slug flow โดยสมการสามารถนิยามได้ดังนี้

$$\mu_{tp} = \mu_g \frac{2\mu_g + \mu_l - 2(\mu_g - \mu_l)(1-x)}{2\mu_g + \mu_l + (\mu_g - \mu_l)(1-x)} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\mu_{tp}$  คือ ค่าความหนืดพลวัตของของไหลสองสถานะ

$\mu_g$  คือ ค่าความหนืดพลวัตของไหลสถานะแก๊ส

$\mu_l$  คือ ค่าความหนืดพลวัตของไหลสถานะของเหลว

ซึ่ง  $x$  หรือคุณภาพเชิงไอ สามารถหาได้จากสมการ

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_l} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\dot{m}_g$  และ  $\dot{m}_l$  คืออัตราไหลเชิงมวลของแก๊สและของเหลว ตามลำดับ  
ตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะนิยามได้จากสมการต่อไปนี้

$$Re_{tp} = \frac{GD_h}{\mu_{tp}} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $Re_{tp}$  คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะ

$G$  คือ ฟลักซ์เชิงมวล

## 2.2.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะ

จากงานวิจัยของ Pansunee [11] ได้เสนอให้คำนวณตัวเลขนัสเซลท์ของการไหลสถานะ เดียวและการไหลแบบ segmented flow หรือแบบ slug flow ได้จากสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$Nu(x) = \frac{h(x)D_h}{k_l} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $Nu(x)$  คือ ตัวเลขนัสเซลท์เฉพาะที่

$k_l$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของเหลว

$$Nu_{avg} = \frac{h_{avg}D_h}{k_l} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $Nu_{avg}$  คือ ตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ Arya [5] ได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อน (Performance Index, PI) ไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$PI = \frac{Nu_{wavy}}{Nu_{straight}} \times \left( \frac{\Delta P_{straight}}{\Delta P_{wavy}} \right)^{1/3} \quad (2.13)$$

เมื่อ	PI	คือ	ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อน
	$Nu_{wavy}$	คือ	ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของท่อคลื่น
	$Nu_{straight}$	คือ	ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของท่อตรง
	$\Delta P_{wavy}$	คือ	ความดันตกของท่อคลื่น
	$\Delta P_{straight}$	คือ	ความดันตกของท่อตรง

### 2.3 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method)

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล หรือ CFD (Computational Fluid Dynamics) เป็นการใช้ระบบสมการทางคณิตศาสตร์ช่วยแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหล โดยทำการแก้ปัญหาลักษณะของสมการควบคุม (Governing Equations) อาทิเช่น สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier Stokes Equation) ที่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์ (Conservation Equations) เป็นต้น ซึ่งสมการเหล่านี้จะถูกทำการแปลงให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต (Algebraic Equations) ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method), ระเบียบวิธีผลต่าง สิบเนื่อง (Finite Difference Method), ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นต้น จากนั้นจึงหาผลเฉลยเชิงตัวเลข และจำลองตัวแปรต่างๆ ในทางกายภาพ ทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์และอภิปรายผลสำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์ แบ่งได้เป็น 3 สมการ คือ

- สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)
- สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equation)
- สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation)

โดยสมการควบคุมของการไหลสามารถอธิบายด้วยกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์ดังนี้

- มวลของไหลไม่สูญหาย
- อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานเท่ากับผลรวมของอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนกับงานที่กระทำในอนุภาคของไหล

### 2.3.1 สมการควบคุม (Governing Equations)

สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการสมดุลได้ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของ

สามารถเขียนอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหลได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t}(\delta x \delta y \delta z) \quad (2.14)$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่น,  $t$  คือ เวลา,  $\delta x$  คือ ระยะทางในแกน  $x$ ,  $\delta y$  คือ ระยะทางในแกน  $y$ ,  $\delta z$  คือ ระยะทางในแกน  $z$

สามารถเขียนอัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล ซึ่งนิยามโดยผลคูณของความหนาแน่นพื้นที่ผิวและความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2.15)$$

โดย  $u$  คือ ความเร็วในแกน  $x$ ,  $v$  คือ ความเร็วในแกน  $y$ ,  $w$  คือ ความเร็วในแกน  $z$  การไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยถูกกำหนดให้เป็นบวก และการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อยกำหนดให้เป็นลบ จากความสัมพันธ์อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหลเท่ากับอัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล เมื่อหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย  $\delta x \delta y \delta z$  และจัดรูปใหม่ได้ ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

หรือในรูปแบบเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.17)$$

สมการที่ 2.17 คือสมการความต่อเนื่อง สำหรับของไหลแบบอัดตัวได้และการไหลไม่คงตัว เทอมแรกคืออัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลง เทอมสองคือ การไหลสุทธิของมวลผ่านขอบเขตปริมาตรเล็กๆ เรียกอีกอย่างว่าเทอมของการพา สำหรับของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ความหนาแน่นคงที่ สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

หรือในรูปแบบเวกเตอร์

$$\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (2.19)$$

สำหรับสมการความต่อเนื่องแบบการไหลสองสถานะ สามารถแยกสมการได้เป็น 2 สมการ

ดังนี้

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{\mathbf{V}}_l) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{\mathbf{V}}_g) = 0 \quad (2.21)$$

โดย  $\alpha_l$  คือ สัดส่วนปริมาตรของสถานะของเหลว,  $\alpha_g$  คือ สัดส่วนปริมาตรของสถานะแก๊ส,  $\rho_l$  คือความหนาแน่นของสถานะของเหลว,  $\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของสถานะแก๊ส,  $\bar{\mathbf{V}}_l$  คือ ความเร็วของสถานะของเหลว,  $\bar{\mathbf{V}}_g$  คือ ความเร็วของสถานะแก๊ส

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอนุภาคการไหล คุณสมบัติแต่ละอย่างจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (x,y,z) ในแต่ละอนุภาคและเวลา (t) โดยกำหนดให้  $\phi$  คือ คุณสมบัติใดๆต่อมวล  $\frac{D\phi}{Dt}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติใดๆเทียบกับเวลา สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad (2.22)$$

สามารถจัดรูปใหม่เป็น

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \frac{\partial\phi}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial\phi}{\partial \mathbf{y}} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial\phi}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \quad (2.23)$$

ในกรณีสมการอนุรักษ์มวล เราสนใจอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้นจึงคูณความหนาแน่นเข้าไป ในเทอม  $\frac{D\phi}{Dt}$  สามารถเขียนรูปสมการใหม่ได้ ดังนี้

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

รูปแบบนี้สามารถนำไปใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของของไหลในปริมาณเล็กๆ ที่หยุดนิ่งเป็นการนิยามความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์คุณสมบัติของของไหล กับ อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในปริมาตรย่อยๆ ของของไหล และสามารถเขียนรูปทั่วไปของสมการความต่อเนื่องของคุณสมบัติใดๆของของไหลได้ ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) \quad (2.25)$$

ในเทอมแรกของสมการ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่อหน่วยปริมาตร เทอมที่สอง คือ การไหลสุทธิของคุณสมบัติใดๆต่อหน่วยปริมาตรที่ออกจากชิ้นส่วนย่อยของไหล ซึ่งสามารถนำมาเขียนใหม่ให้ความสัมพันธ์ ระหว่างผลรวมของทั้งสองเทอมกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติใดๆในอนุภาคของไหล ได้ดังนี้

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \left( \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \text{grad}\phi \right) + \phi \left( \frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right) = \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) \quad (2.26)$$

เนื่องจากสมการความต่อเนื่องทำให้ เทอม  $\phi \left( \frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}) \right)$  เท่ากับศูนย์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  ในชั้นส่วนย่อยของไหล + อัตราการไหลสุทธิของ  $\phi$  ออกจากชั้นส่วนย่อยของไหล = อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  สำหรับอนุภาคของไหล

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหล และการเปลี่ยนแปลงของพลังงานซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์นั้น สามารถแทนด้วยตัวแปร  $\phi$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ต่อหน่วยปริมาตรตามที่นิยามไว้ในสมการที่ 2.25 และ 2.26 เขียนได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงรูปแบบการสร้างสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน

x-momentum	$u$	$\rho \frac{Du}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u v)$
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	$E$	$\rho \frac{DE}{Dt}$	$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E v)$

การแบ่งสัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ในของไหลสองสถานะ คือ สถานะของเหลวและสถานะแก๊ส สามารถเขียนสมการจากความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (2.27)$$

$$\alpha_l = \begin{cases} 1 & : \text{เติมไปด้วยสถานะของเหลว} \\ 1-0 & : \text{ของเหลวผสมกับแก๊ส} \\ 0 & : \text{เติมไปด้วยสถานะแก๊ส} \end{cases} \quad (2.28)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม จากกฎข้อที่สองของนิวตันกล่าวไว้ “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาค”

อัตราการเพิ่มโมเมนตัมของอนุภาคของไหล = ผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล

แรงกระทำต่ออนุภาคของไหลแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แรงกระทำที่ผิว (Surface forces) เช่น แรงเนื่องจากความดัน แรงเนื่องจากความหนืด แรงโน้มถ่วง เป็นต้น และแรงกระทำในปริมาตร (Body forces) ได้แก่ แรงหนีศูนย์กลาง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถเขียนสมการอนุรักษ์โมเมนตัมของการไหลสองสถานะได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \left[ \mu \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) + \sigma k \frac{\rho \nabla \alpha_g}{0.5 \times (\rho_l + \rho_g)} \right] \quad (2.29)$$

โดย  $\vec{v}$  คือ ความเร็วรวมของทั้งสองสถานะ,  $P$  คือ สันามความดัน,  $\mu$  คือ ความหนืดพลวัตรวมของทั้งสองสถานะ,  $\sigma$  คือ แรงตึงผิวระหว่างรอยต่อของทั้งสองสถานะ,  $k$  คือ เส้นโค้งรอยต่อระหว่างทั้งสองสถานะ

จากกฎของ Volume-weighted mixture สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการความหนาแน่นรวมของทั้งสองสถานะ และความหนืดพลวัตรวมของทั้งสองสถานะได้ ดังนี้

$$\rho = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l \quad (2.30)$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + (1 - \alpha_g) \mu_l \quad (2.31)$$

ค่าของเส้นโค้งรอยต่อระหว่างทั้งสองสถานะ สามารถหาได้จากสมการ

$$k = \nabla \cdot \hat{n} \quad (2.32)$$

โดย  $\hat{n}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยหาได้จาก  $\hat{n} = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}$  และ  $\mathbf{n}$  หาได้จาก  $\mathbf{n} = \nabla \alpha_l$

การเปลี่ยนแปลงมุมของผนังที่มีเอลิเมนต์ติดกันในทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจะถูกระบุค่าโดยมุมผิวสัมผัสของท่อ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการได้ ดังนี้

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

โดย  $\hat{n}_w$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผนัง,  $\hat{t}_w$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับผนัง,  $\theta_w$  คือ มุมผิวสัมผัส

สมการอนุรักษ์พลังงาน จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหลเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เพิ่มเข้าไปในอนุภาคของไหลบวกกับอัตราการทำงานสุทธิของอนุภาคของไหล

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เพิ่มเข้าไปในอนุภาคของไหล} + \text{อัตราการทำงานสุทธิของอนุภาคของไหล} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหล}$$

พลังงานจำเพาะของของไหลแทนที่ด้วย  $E$  ซึ่งถูกนิยามโดย ผลรวมของพลังงานภายใน, พลังงานจลน์ และพลังงานศักย์โน้มถ่วง การนิยามนี้มีสมมุติฐานว่า อนุภาคของไหลมีการสะสมพลังงานศักย์โน้มถ่วงไว้ พลังงานภายในอาจไม่รวมพลังงานศักย์โน้มถ่วงเข้าไปด้วย หากอนุภาคของไหลกำลังเคลื่อนที่ในสนามโน้มถ่วงเรียกงานในส่วนนี้ว่า งานเนื่องจากน้ำหนักของอนุภาคซึ่งอยู่ในเทอมการก่อกำเนิด

การอนุรักษ์พลังงานสามารถอธิบายได้โดยกำหนดให้ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหล เท่ากับ ผลรวมของงานสุทธิที่เกิดบนอนุภาคของไหลและอัตราความร้อนสุทธิที่เพิ่มขึ้นของของไหลเนื่องจากฟลักซ์ความร้อน และอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานเนื่องจากเทอมของการก่อกำเนิด มีสมการดังนี้

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(\rho u) \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial u\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial u\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial u\tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial v\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial v\tau_{yy}}{\partial y} \\ + \frac{\partial v\tau_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial w\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial w\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial w\tau_{zz}}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \text{ grad}T) + S_E \quad (2.34)$$

โดยที่  $E$  คือ พลังงานจำเพาะของของไหล หาได้จาก  $E = i + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$

สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน ค่าความหนืดสามารถอธิบายได้จากค่าฟังก์ชันของการสูญเสียรูปร่างที่ตำแหน่งใดๆ ประกอบไปด้วย อัตราการเสียรูปร่างเชิงเส้นและอัตราการเสียรูปร่างเชิงปริมาตรในการไหลแบบนิวโทเนียน ความเค้นที่เกิดจากความหนืดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเสียรูปร่างของของไหล สามารถเขียนสมการในรูปแบบวิธีปริมาตรสืบเนื่องได้ ดังนี้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ gradu}) + S_{Mx} \quad (2.35)$$

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

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad}w) + S_{Mz} \quad (2.37)$$

สำหรับสมการความหนืดในพลังงานภายใน สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \text{ div}u + \text{div}(k \text{ grad}T) + \Phi + S_i \quad (2.38)$$

โดย  $\Phi$  คือ การสลายตัว มีค่าเป็นบวกเสมอ เนื่องจากประกอบด้วยเทอมยกกำลังสอง อธิบายได้ว่าเป็นการก่อกำเนิดของพลังงานภายในจากการเสียดรูปทรงของชิ้นส่วนของไหล อีกความหมายหนึ่ง คือ เป็นตัวลดทอนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายในหรือความร้อน สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\Phi = \mu \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda (\text{div}u)^2 \quad (2.39)$$

### 2.3.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Model)

การไหลแบบปั่นป่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลตลอดเวลา เกิดความผันผวนของค่าตัวแปรในการคำนวณ ดังนั้นในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน แบ่งได้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลา และส่วนที่มีความผันผวนกับเวลา ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน มีการสร้างแบบจำลองมากมายเพื่อให้สามารถทำนายการไหลได้อย่างแม่นยำภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ เช่น แบบจำลอง  $k-\epsilon$  สามารถทำนายการไหลในช่วงไหลขอบเขตได้ดี, แบบจำลอง  $k-\omega$  สามารถทำนายการไหลในช่วงไหลขอบเขตได้ดี เป็นต้น แบบจำลอง  $k-\omega$  SST ที่ได้ทำการรวมเอาข้อดีของทั้งสองแบบจำลองเข้าด้วยกัน ซึ่งสมการในแบบจำลองมีสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ Turbulent kinetic energy ( $k$ ) เป็นพลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยมวลของ Turbulent fluctuation สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - D_k \quad (2.40)$$

สมการ Specific Dissipation Rate ( $\omega$ ) เป็นอัตราการกระจายตัวจำเพาะ สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \rho \frac{P_k}{\mu_t} - D_\omega + 2(1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (2.41)$$

โดยที่  $P_k$  คือ production limiter และ  $CD_{k\omega}$  คือ cross-diffusion มีนิยามดังต่อไปนี้

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k\omega \right) \quad (2.42)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho\sigma_\omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (2.43)$$

สำหรับค่าคงที่ของแบบจำลอง SSR มีค่าดังนี้  $a_1 = 0.31$ ,  $k = 0.41$ ,  $\beta^* = 0.09$  การปรับปรุงฟังก์ชันการคำนวณค่า Eddy viscosity เพื่อทำนายการไหลแบบแยกตัว เขียนสมการ Blending functions ได้ ดังนี้

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_\omega^2 k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (2.44)$$

โดย  $\nu$  คือ kinematic eddy viscosity สามารถนิยามได้ ดังนี้

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (2.45)$$

โดย  $F_2$  เป็นฟังก์ชันของ second blending สามารถนิยามได้ ดังนี้

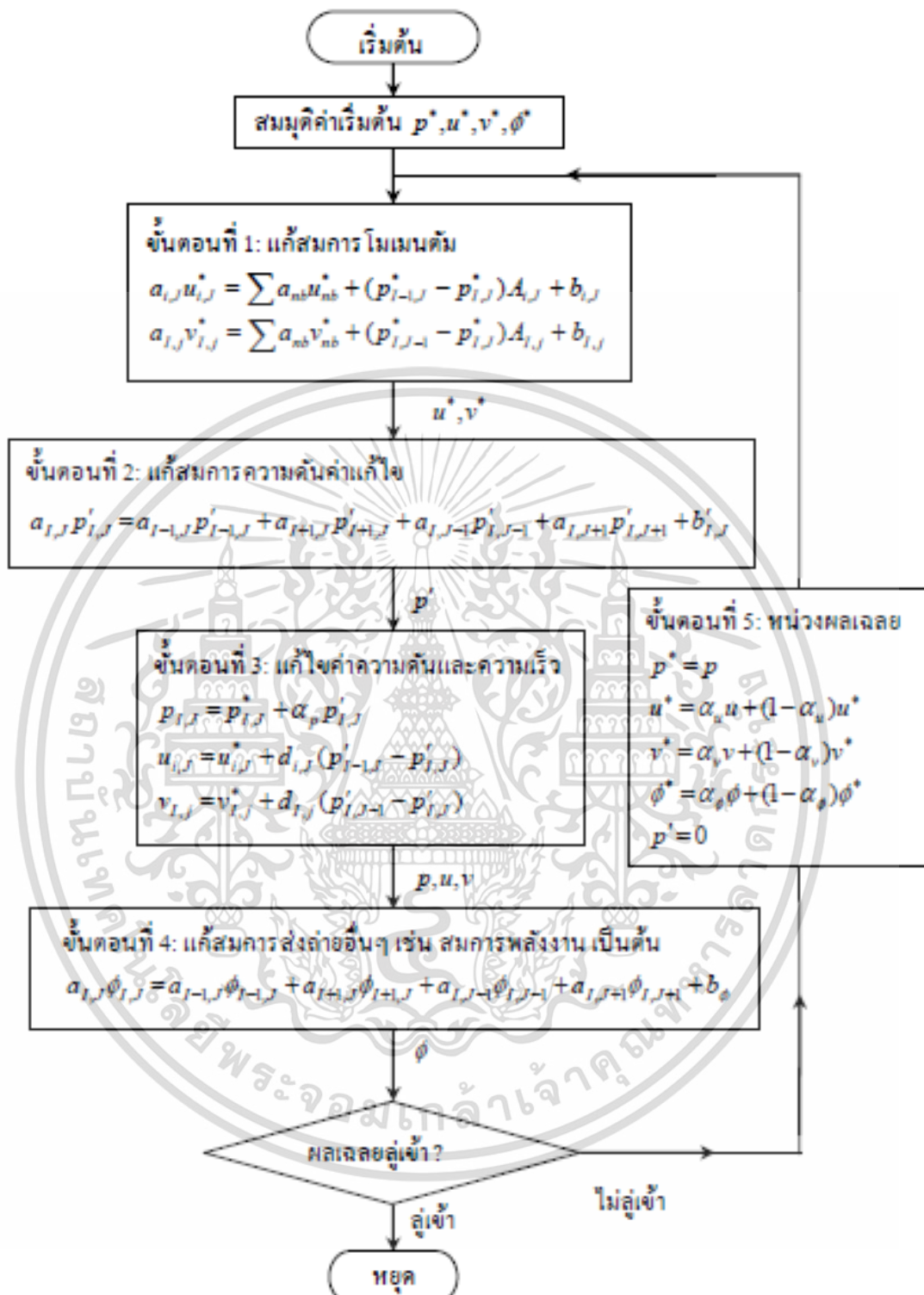
$$F_2 = \tanh \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \quad (2.46)$$

### 2.3.3 ปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็ว (Pressure-velocity coupled)

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลตามระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื้อจะมีวิธีคำนวณลำดับความดันและความเร็วอยู่หลายวิธี เช่น ลำดับวิธีแบบ SIMPLE, ลำดับวิธีแบบ PISO เป็นต้น ลำดับวิธีต่างๆจะเหมาะสมกับแบบจำลองที่แตกต่างกัน

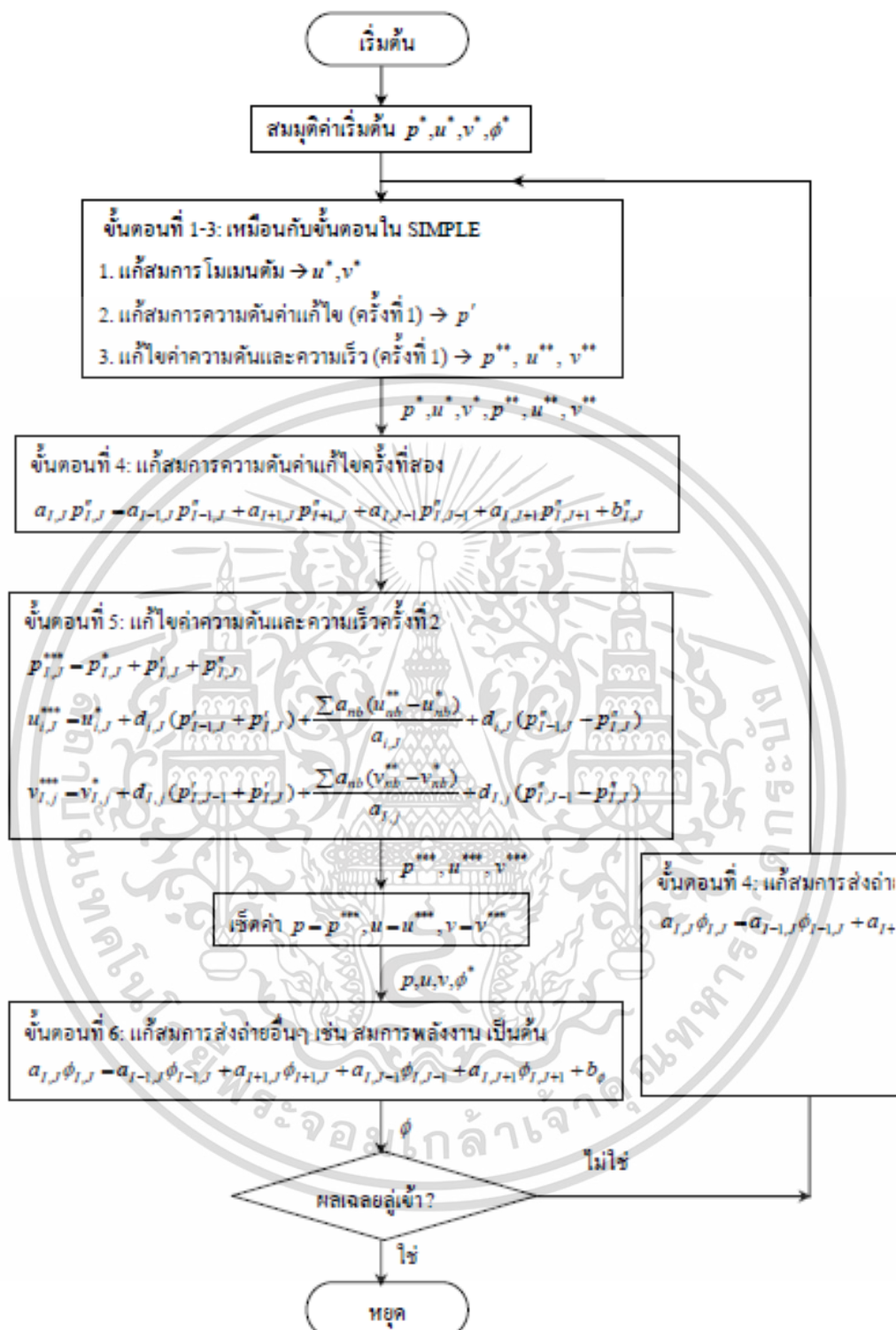
ลำดับวิธีแบบ SIMPLE หรือ Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations เป็นลำดับวิธีที่เหมาะสมกับการไหลแบบคงตัว สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ว่า เริ่มแรกสมมติความดันเป็นค่าเริ่มต้นค่าหนึ่ง จากนั้นนำค่าความดันไปแก้สมการควบคุมอื่นๆจะได้ค่าความเร็ว อุณหภูมิและปริมาณสเกลาร์อื่นๆ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแก้สมการควบคุมเพื่อหาความดันอีกครั้ง ความดันที่ได้จากการแก้ไขนี้เรียกว่า ความดันที่ถูกแก้ไข จากนั้นนำความดันที่ถูกแก้ไขไปแก้สมการควบคุม เพื่อหาค่าอื่นๆอีกครั้ง จากนั้นตรวจสอบความลู่เข้าของสมการ ถ้ายังไม่ลู่เข้าจะนำค่าที่ได้ไปแก้ด้วยวิธีเดิมจนกว่าจะมีการลู่เข้าของผลเฉลย ลำดับการดำเนินงานวิธี SIMPLE แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2

ลำดับวิธีแบบ PISO หรือ Pressure-Implicit with Splitting of Operators เป็นลำดับวิธีที่เหมาะสมกับการไหลไม่คงตัว การไหลแบบสองสถานะ โดยมีลักษณะการทำงานคล้ายกับแบบ SIMPLE เพียงแต่จะมีการแก้ไขตัวแปรสองครั้งก่อน นำไปตรวจการลู่เข้าของผลเฉลย ลำดับการดำเนินงานของวิธีแบบ PISO แสดงอยู่ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE  
โดย กীরติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ PISO โดย กิริติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

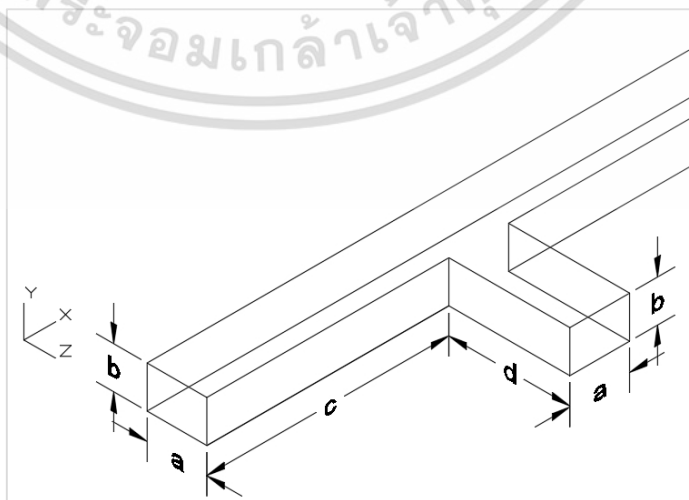
### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 การเลือกขนาดกริดที่เหมาะสม (Grid Independence) ของของไหลสองสถานะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกของของไหลสถานะเดียวและสองสถานะในท่อตรงและท้อคลื่น ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด  $0.43 \times 0.617 \text{ mm}^2$  ในการศึกษาใช้โปรแกรม Ansys Fluent ในการจำลองแบบจำลอง

##### 3.1.1 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบผล

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาเป็นงานวิจัยของ Choi et al. [3] ซึ่งทำการทดลองการไหลสองสถานะของน้ำ-ไนโตรเจนในท่อตรงโดยใช้ท่อผสมรูปตัว T โดยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ลดความยาวท่อที่ทางเข้าของน้ำและทางเข้าของไนโตรเจนลง จากเดิมความยาวท่อที่ทางเข้าน้ำและไนโตรเจนยาว 15 mm และ 20 mm ตามลำดับ ทั้งนี้การลดความยาวไม่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้ เนื่องจากช่วงเริ่มต้นของการจำลองได้กำหนดให้ภายในท่อทั้งหมดเป็นน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปไนโตรเจนจึงเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่น้ำและค่อยๆดันให้น้ำไหลออกไปตามท่อ ในจุดที่น้ำและไนโตรเจนสัมผัสกันเกิดการผสมกันกลายเป็นชั้นฟิล์ม เมื่อไนโตรเจนเคลื่อนที่มาถึงทางแยกรูปตัว T ไนโตรเจนก็เริ่มไหลออกจากท่อด้านข้างและเบนตัวเคลื่อนตัวไปตามน้ำ เมื่อเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆกระแสไนโตรเจนก็บางลงจนถึงจุดหนึ่งจึงขาดออกจากกัน จากนั้นชั้นฟิล์มก็ห่อหุ้มไนโตรเจนไว้ด้านใน เกิดเป็นฟองไหลไปตามท่อ จากกระบวนการดังกล่าวเห็นได้วาระยะทางที่ทางเข้าของน้ำและไนโตรเจนไม่ส่งผลกระทบต่อ การจำลองทำให้สามารถลดระยะทางที่เข้าได้ ส่งผลให้เวลาในการจำลองลดลง ประหยัดเวลามากขึ้น



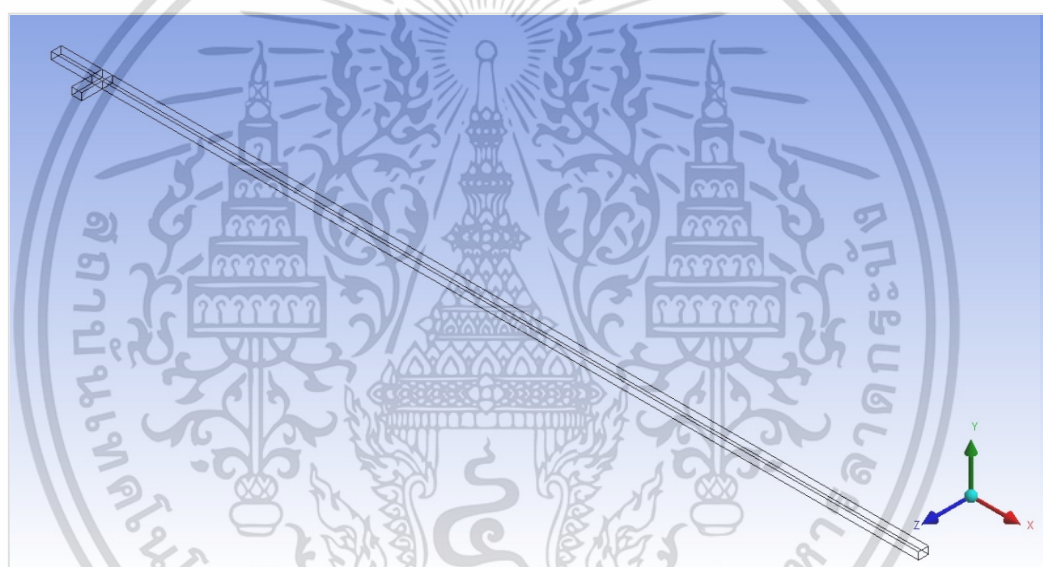
รูปที่ 3.1 แสดงขนาดแบบจำลองของของไหลสองสถานะในท่อตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของตัวแปรในรูปที่ 3.1

ระยะ	ความยาว (mm)
a	0.617
b	0.430
c	2.500
d	1.250

รูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงแบบจำลองท่อตรงที่ใช้ในการศึกษา ขนาดและระยะทางต่างๆของแบบจำลองท่อตรงเป็นดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของของไหลสองสถานะในท่อตรง

### 3.1.2 การแบ่งกริดที่ใช้ในการจำลอง (Meshing)

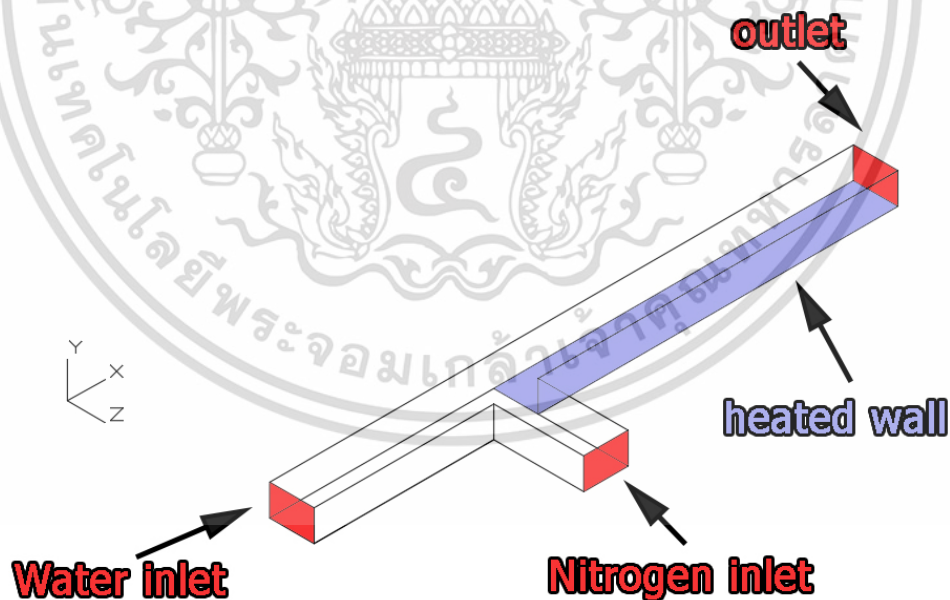
การแบ่งจำนวนกริดที่เหมาะสมนั้นมีความสำคัญในการจำลองเชิงตัวเลข เนื่องจากต้องหาจุดเหมาะสมระหว่างเวลาที่ใช้ในการจำลองและความแม่นยำของแบบจำลอง โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งจำนวนกริด เป็น 240000, 300000, 360000 และ 410000 กริด ในหัวข้อ Sizing กำหนด Sizing Function เป็น adaptive, Relevance Center เป็น Fine ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Fine
<input type="checkbox"/> Element Size	3.5e-005 m
Initial Size Seed	Assembly
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Minimum Edge Length	4.3e-004 m
Quality	
Inflation	
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
<input checked="" type="checkbox"/> Nodes	413896
<input type="checkbox"/> Elements	363870

รูปที่ 3.3 แสดงการตั้งค่ากริด

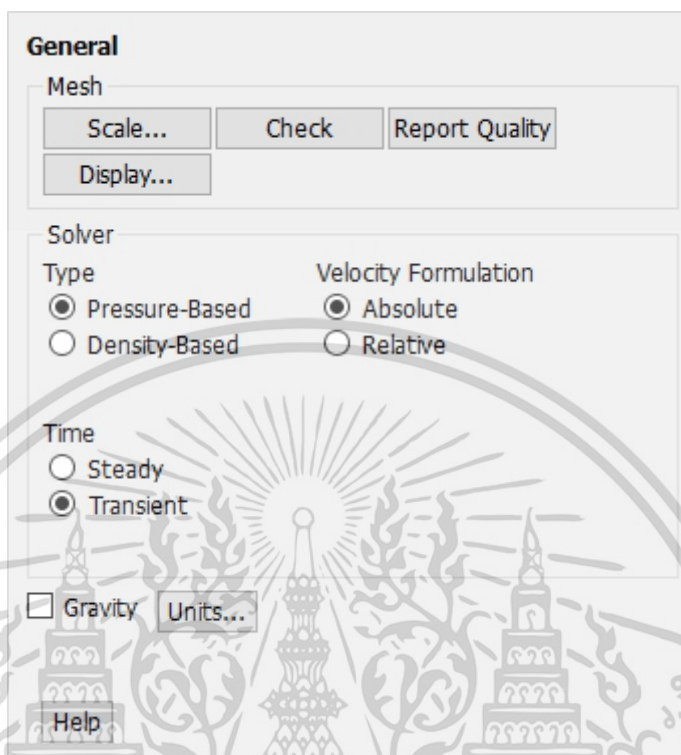
การกำหนดชื่อในส่วนต่างๆของท่อ เป็นไปดังรูปที่ 3.4 โดยความยาวของท่อจากทางเข้าน้ำคือ 53.117 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.507 mm



รูปที่ 3.4 แสดงส่วนต่างๆของท่อตรง

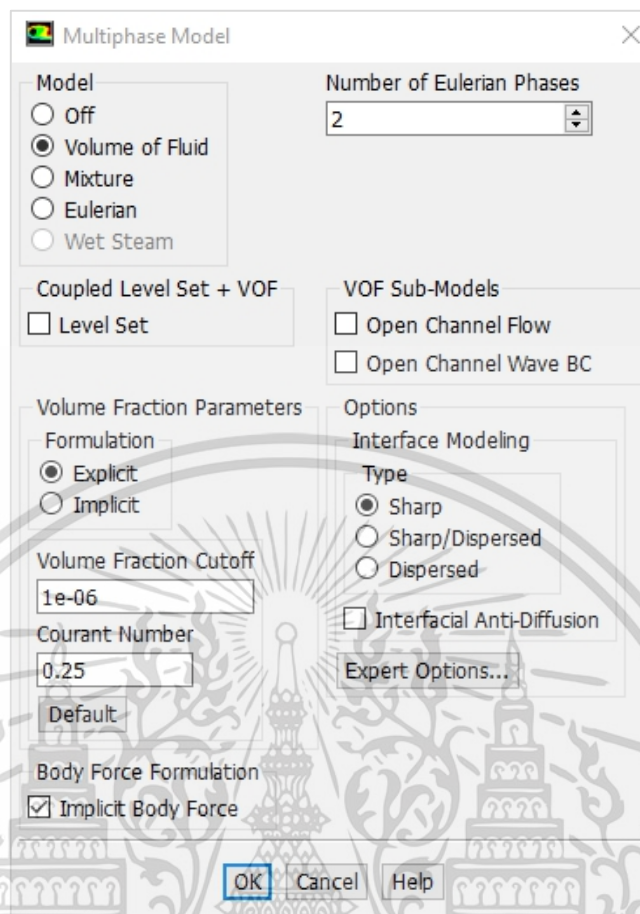
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)



รูปที่ 3.5 แสดงการตั้งค่าทั่วไป

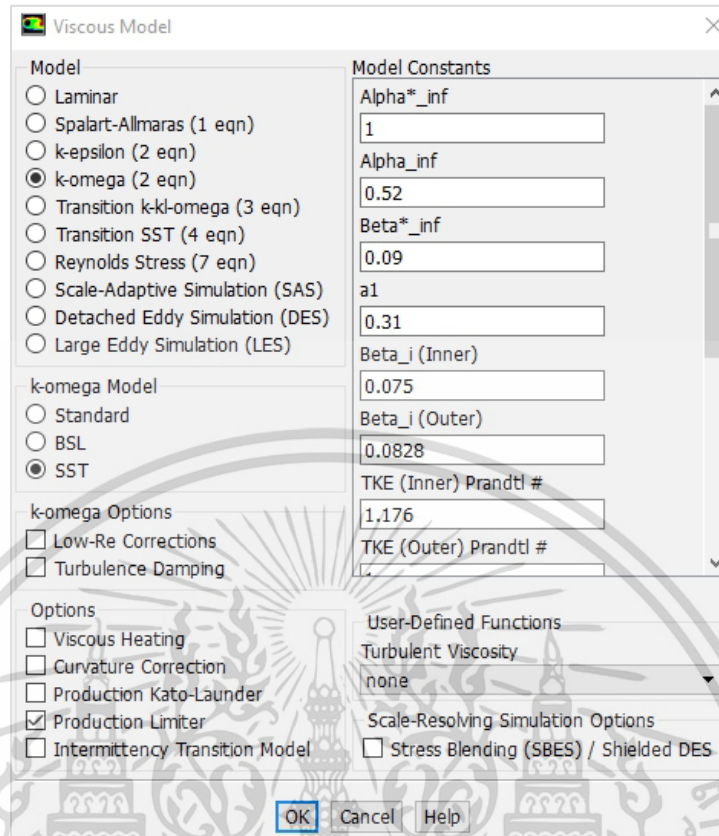
การกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง ในหัวข้อทั่วไป (General) กำหนดการไหลเป็นแบบขึ้นอยู่กับเวลา (transient) และไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วงเนื่องจากของไหลไหลในท่อแนวนอน แสดงรายละเอียดการกำหนดค่าต่างๆดังรูปที่ 3.5



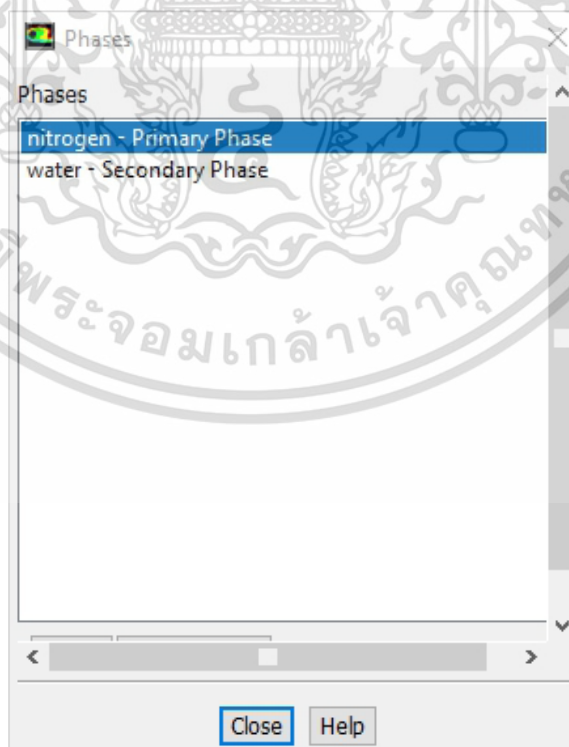
รูปที่ 3.6 แสดงการตั้งค่าแบบจำลองสองสถานะ

การกำหนดค่าในหัวข้อแบบจำลอง (model) กำหนดการไหลให้เป็นการไหลสองสถานะและใช้ระเบียบวิธีแบบ VOF (volume of fluid) ในการแก้ปัญหา แบบจำลองความหนืดใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k-omega SST เนื่องจากสามารถทำนายได้ดีทั้งช่วงใกล้และไกลผนังท่อ เหมาะสำหรับแบบจำลองการไหลสองสถานะ ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7

การกำหนดในหัวข้อสถานะ (phase) กำหนดไนโตรเจนเป็นสถานะหลัก และน้ำเป็นสถานะรอง กำหนดสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวระหว่างไนโตรเจนและน้ำ เท่ากับ 0.072 n/m มุมระหว่างของไหลกับผนังท่อ เท่ากับ 25 องศา ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9

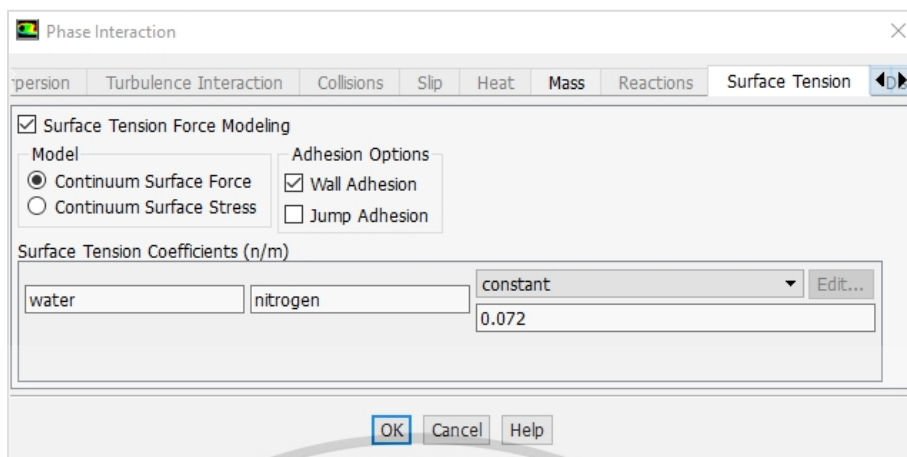


รูปที่ 3.7 แสดงการตั้งค่าแบบจำลองความปั่นป่วน

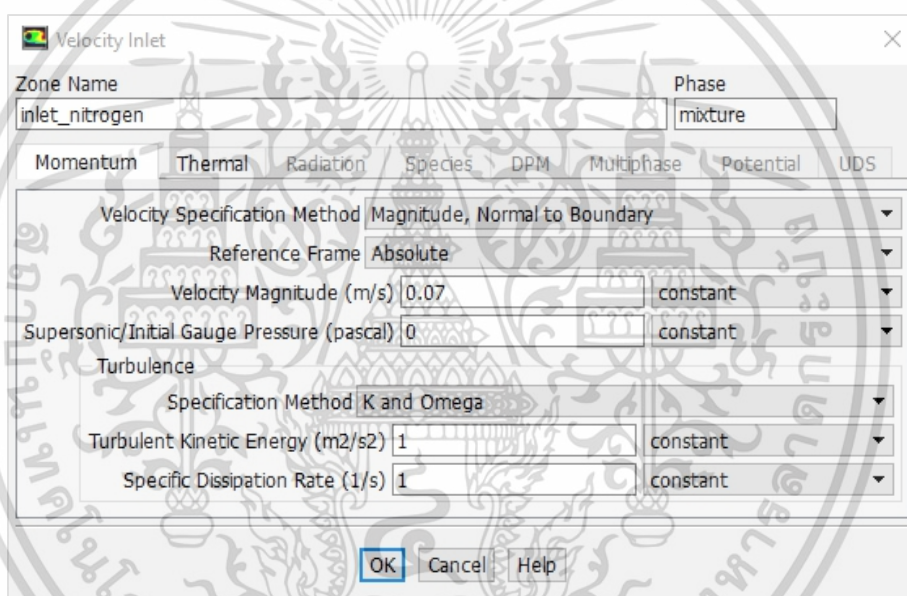


รูปที่ 3.8 แสดงการตั้งค่าสถานะของของไหลสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการตั้งค่าสัมประสิทธิ์แรงตึงผิวและมุมที่ผิวสัมผัสของไหล



รูปที่ 3.10 แสดงการตั้งค่าที่ทางเข้าไนโตรเจน

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ความเร็วที่ทางเข้าน้ำ เท่ากับ 0.25 m/s ความเร็วที่ทางเข้าไนโตรเจน เท่ากับ 0.07 และ 0.65 m/s อุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งสองทาง เท่ากับ 300 K กำหนดสถานะน้ำที่ทางเข้าของน้ำ Volume fraction เท่ากับ 0 สถานะน้ำที่ทางเข้าของไนโตรเจน มี Volume fraction เท่ากับ 1 เพื่อให้ น้ำและไนโตรเจนแยกเข้าในแต่ละทาง และค่าต่างๆเป็นดังรูปที่ 3.10, 3.11 และ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Velocity Inlet

Zone Name: inlet\_water Phase: mixture

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 0.25 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence

Specification Method: K and Omega

Turbulent Kinetic Energy (m2/s2): 0 constant

Specific Dissipation Rate (1/s): 1 constant

OK Cancel Help

รูปที่ 3.11 แสดงการตั้งค่าที่ทางเข้าน้ำ

Velocity Inlet

Zone Name: inlet\_nitrogen Phase: water

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Volume Fraction: 0 constant

OK Cancel Help

Velocity Inlet

Zone Name: inlet\_water Phase: water

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

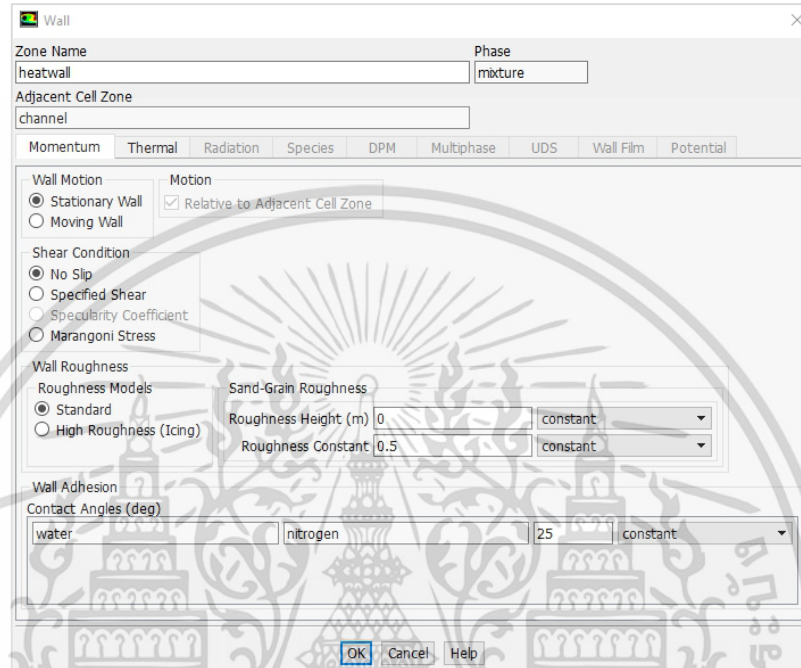
Volume Fraction: 1 constant

OK Cancel Help

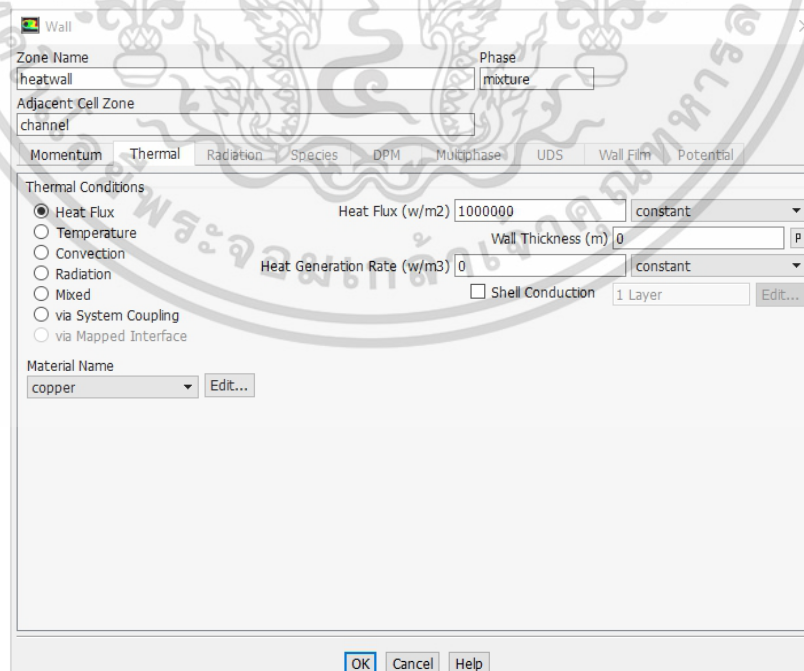
รูปที่ 3.12 แสดงการตั้งค่าที่สถานะน้ำของทางเข้าไนโตรเจนและน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดเงื่อนไขที่ผนังท่อด้านheated wall ฟลักซ์ความร้อน เท่ากับ  $1000000 \text{ W/m}^2$  และมีมุมผิวสัมผัส(Contact Angles) เท่ากับ 25 องศา ส่วนผนังท่อด้านอื่นๆ มีมุมผิวสัมผัส เท่ากับ 25 องศา เช่นกันดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



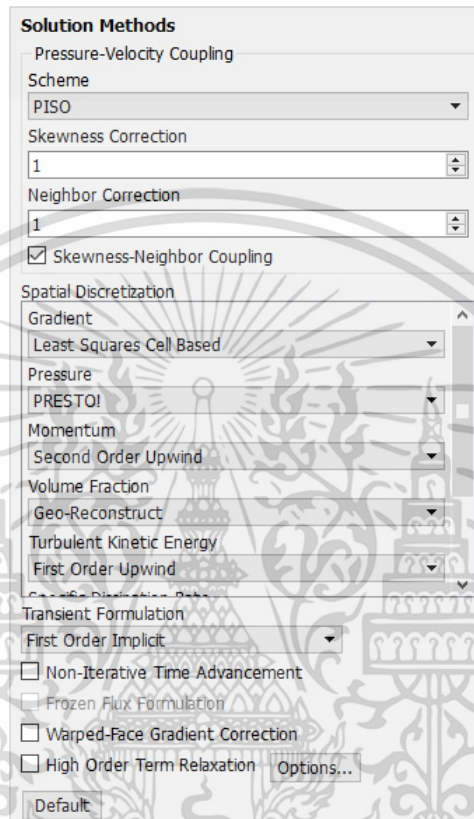
รูปที่ 3.13 แสดงการตั้งค่ามุมผิวสัมผัส



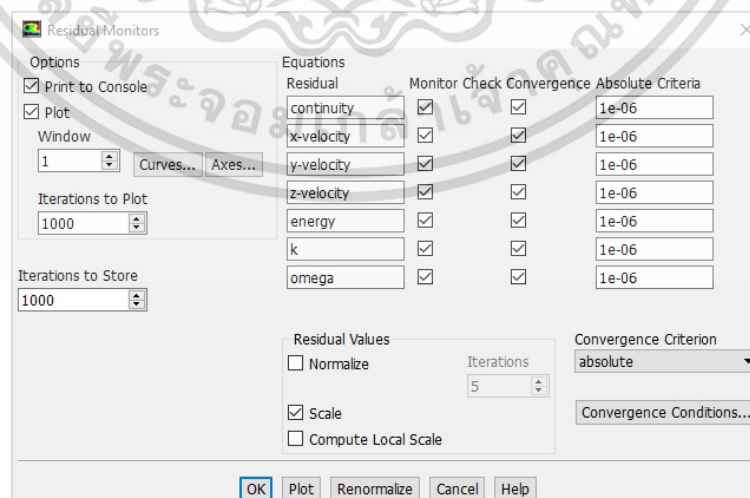
รูปที่ 3.14 แสดงการตั้งค่าฟลักซ์ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาผลเฉลยความดันและความเร็วใช้ระเบียบวิธีแบบ PISO เนื่องจากเหมาะสมสำหรับแบบจำลองที่มีความปั่นป่วน และแบบจำลองที่เป็นการไหลของของไหลสองสถานะ กำหนดค่า Convergence Absolute Criteria เป็น  $1e-06$  รายละเอียดเป็นดังรูปที่ 3.15 และ 3.16



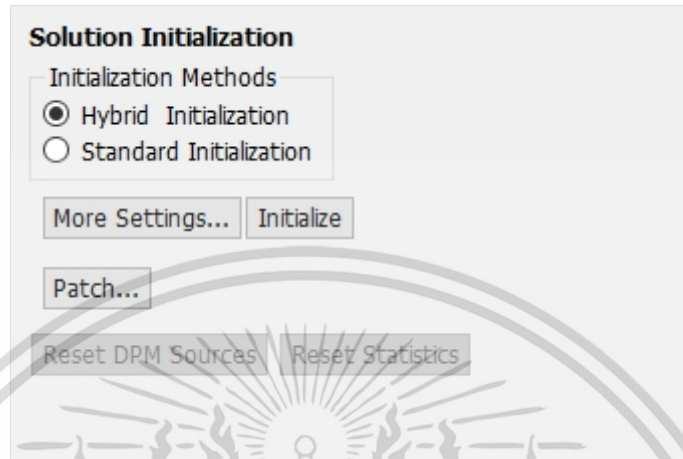
รูปที่ 3.15 แสดงการหาผลเฉลยความดันและความเร็ว



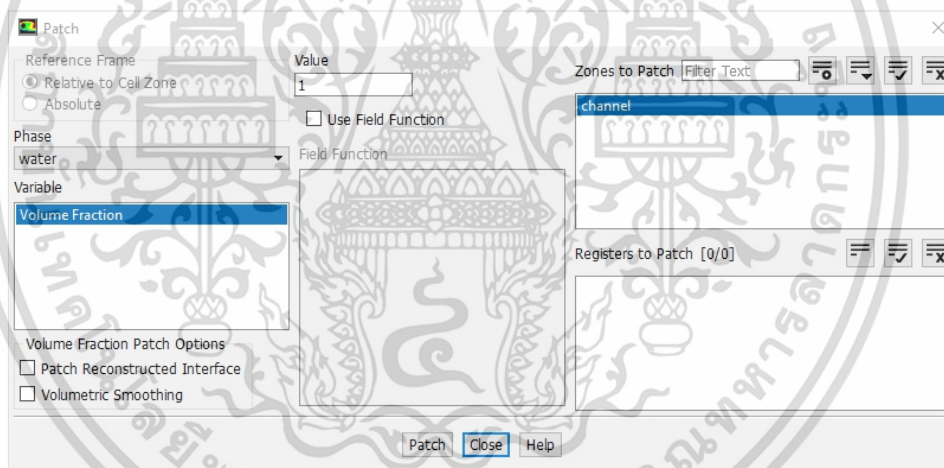
รูปที่ 3.16 แสดงการตั้งค่า Residual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดวิธีสมมุติค่าตอบเริ่มต้นแบบ Hybrid Initialization และใช้เทคนิค Patch ทำให้ของไหลในแบบจำลองช่วงเริ่มต้นเป็นน้ำทั้งหมด รายละเอียดเป็นดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.17 แสดงการสมมุติค่าตอบเริ่มต้น



รูปที่ 3.18 แสดงการตั้งค่า Patch

ในหัวข้อ Run Calculation ใช้ Time Stepping Method เป็นแบบ Variable เนื่องจากช่วงเริ่มต้นของการไหลสามารถใช้ time step size ที่ใหญ่ได้ ช่วยให้การคำนวณเร็วขึ้น และกำหนดให้เวลาการไหลเป็น 0.17 วินาที รายละเอียดเป็นดังรูปที่ 3.19 และ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Run Calculation**

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Variable  
Time Step Size (s): 1e-05  
Number of Time Steps: 50000

Options

Extrapolate Variables  
 Data Sampling for Time Statistics

Sampling Interval: 1  
Time Sampled (s): 0

Solid Time Step  
 User Specified  
 Automatic

Max Iterations/Time Step: 60  
Reporting Interval: 1  
Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals...  
Acoustic Sources FFT...

Calculate Help

รูปที่ 3.19 แสดงการตั้งค่าในหัวข้อ Run Calculation

**Variable Time Step Settings**

Global Courant Number: 2  
Ending Time (s): 0.17  
Minimum Time Step Size (s): 1e-05  
Maximum Time Step Size (s): 10  
Minimum Step Change Factor: 0.5  
Maximum Step Change Factor: 5  
Number of Fixed Time Steps: 1  
User-Defined Time Step: none

OK Cancel Help

รูปที่ 3.20 แสดงการตั้งค่า Variable Time Step Settings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมกับแบบจำลอง พิจารณาจากความยาวฟองอากาศ และความดันตก โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Choi et al. [3] ดังที่แสดงในตารางที่ 3.2 เมื่อความเร็วน้ำเท่ากับ 0.25 m/s ความเร็วไนโตรเจน เท่ากับ 0.07 และ 0.65 m/s ซึ่งจำนวนกริดที่ใช้ตรวจสอบ คือ 240k, 300k, 360k และ 410k กริด ผลการจำลองที่ได้เป็นดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการทดลองของ Choi et al. ที่ความเร็วน้ำ ( $V_L$ ) 0.25 m/s

$V_g$ (m/s)	Pressure drop (kPa)	Bubble length (mm)
0.07	0.64	0.82
0.65	1.60	2.25

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการจำลองที่ความเร็วน้ำ ( $V_L$ ) 0.25 m/s ความเร็วไนโตรเจน ( $V_g$ ) 0.07 m/s

Mesh no.	Pressure drop (kPa)	Bubble length (mm)	% Error of Pressure drop	% Error of Bubble length
240k	0.716	1.030	11.9	25.6
300k	0.650	1.051	1.6	28.1
360k	0.647	1.055	1.2	28.7
410k	0.700	1.062	9.4	29.5

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการจำลองที่ความเร็วน้ำ ( $V_L$ ) 0.25 m/s ความเร็วไนโตรเจน ( $V_g$ ) 0.65 m/s

Mesh no.	Pressure drop (kPa)	Bubble length (mm)	% Error of Pressure drop	% Error of Bubble length
240k	1.330	2.388	16.9	6.1
300k	1.406	2.333	12.1	3.7
360k	1.548	2.355	3.2	4.7
410k	1.572	2.336	1.7	3.8

จากตารางที่ 3.4 และ 3.5 กรณีความเร็วไนโตรเจนเท่ากับ 0.07 m/s เมื่อเพิ่มจำนวนกริด จาก 240k เป็น 300k ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนของความดันตกลดลงถึง 10.3 % แต่เมื่อเพิ่มจำนวนกริด เป็น 360k ค่าคลาดเคลื่อนของความดันตกลดลงแค่ 0.4 % เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี

ความเร็วไนโตรเจนเท่ากับ 0.65 m/s การเพิ่มจำนวนกริด 300k เป็น 360k ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนของความดันตกลดลงถึง 8.9 % แต่เมื่อเพิ่มจำนวนกริดเป็น 410k ค่าคลาดเคลื่อนของความดันตกลดลง 1.5 % เท่านั้น จากผลดังกล่าวพบว่า จำนวนกริด 360k มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยในทั้งสองกรณี แต่จำนวนกริด 300k และ 410k มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยเพียงกรณีเดียว ดังนั้นจำนวนกริด 360k จึงเหมาะสมสำหรับแบบจำลองในด้านการทำนายความดันตก

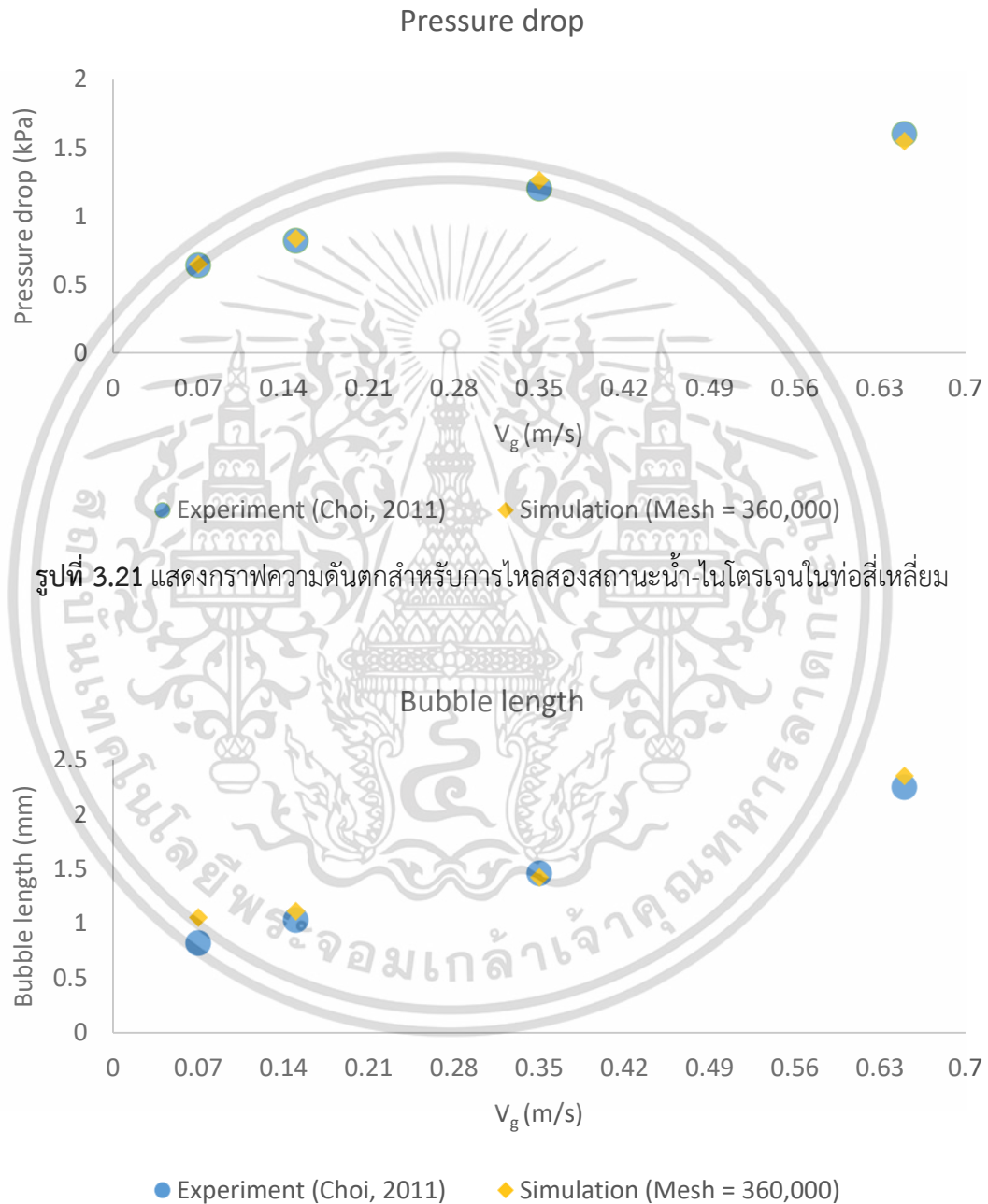
ด้านการทำนายความยาวฟองอากาศ ที่กรณีความเร็วไนโตรเจนเท่ากับ 0.07 m/s ค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 25-30 % การเพิ่มจำนวนกริดส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น กรณีความเร็วไนโตรเจนเท่ากับ 0.65 m/s ค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 3-7 % การเพิ่มจำนวนกริดส่งผลต่อค่าคลาดเคลื่อนยังคงมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน เช่น เมื่อเพิ่มจำนวนกริดจาก 240k เป็น 300k ค่าคลาดเคลื่อนลดลง 2.4 % แต่เมื่อเพิ่มจำนวนกริดเป็น 360k ค่าคลาดเคลื่อนกลับเพิ่มขึ้น 1 % ดังนั้นในด้านการทำนายความยาวฟองอากาศยังคงสรุปจำนวนกริดที่เหมาะสมไม่ได้

ด้านเวลาที่ใช้ในการจำลอง กรณีความเร็วไนโตรเจนเท่ากับ 0.07 m/s และ 0.65 m/s เวลาที่ใช้ไม่แตกต่างกันมากนัก ในกรณีจำนวนกริด 240k และ 300k เวลาที่ใช้ในการจำลองประมาณ 2 วัน เมื่อเพิ่มจำนวนกริดเป็น 360k และ 410k เวลาที่ใช้ก็เพิ่มขึ้นเป็น 5 วัน และ 8 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้เวลาดังกล่าวยังไม่รวมผลที่เกิดจากท่อคลื่นซึ่งทำให้เวลาในการจำลองเพิ่มขึ้น จากผลข้างต้น เมื่อลดจำนวนกริดจาก 410k เป็น 360k เวลาที่ใช้ในการจำลองโดยประมาณลดลงถึง 30 วัน และเมื่อลดจำนวนกริดเป็น 300k เวลาที่ใช้ลดลงโดยประมาณอีก 30 วัน เช่นกัน เพียงแต่จำนวนกริด 300k ไม่สามารถเพิ่มความเร็วไนโตรเจนได้อีก เนื่องจากจะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนมากเกินไป ในขณะที่จำนวนกริด 360k สามารถเพิ่มความเร็วไนโตรเจนได้ และให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดังที่แสดงในรูป 3.21 และ 3.22 ดังนั้นจากการวิเคราะห์ทั้งสามด้านจึงสรุปได้ว่า กริดที่เหมาะสมกับแบบจำลองคือ จำนวนกริด 360k

### 3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation)

รูปที่ 3.21 และ 3.22 แสดงความดันตกและความยาวฟองอากาศสำหรับการไหลของน้ำ-ไนโตรเจนในท่อสี่เหลี่ยม จากรูปจะเห็นได้ว่าความดันตกและความยาวฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองและการทดลอง พบว่าที่ความเร็วไนโตรเจน 0.07 m/s ค่าคลาดเคลื่อนของความดันตกน้อยสุดเท่ากับ 1.2 % และค่าคลาดเคลื่อนของความดันตกมากที่สุดเท่ากับ 5.2 % ที่ความเร็วไนโตรเจน 0.35 m/s ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนของความยาวฟองอากาศที่มากที่สุดและน้อยที่สุดเท่ากับ 28.7 และ 2.6 % อยู่ที่ความเร็วไนโตรเจน 0.07

และ 0.35 m/s ตามลำดับ จากผลดังกล่าวเห็นได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนของความยาวฟองอยู่ในช่วง 2-29 % และค่าคลาดเคลื่อนของความดันตกอยู่ในช่วง 1-6 % ดังนั้นแบบจำลองนี้มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง จึงสามารถใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของของไหลได้



รูปที่ 3.21 แสดงกราฟความดันตกสำหรับการไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อสี่เหลี่ยม

รูปที่ 3.22 แสดงกราฟความยาวฟองอากาศสำหรับการไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อสี่เหลี่ยม

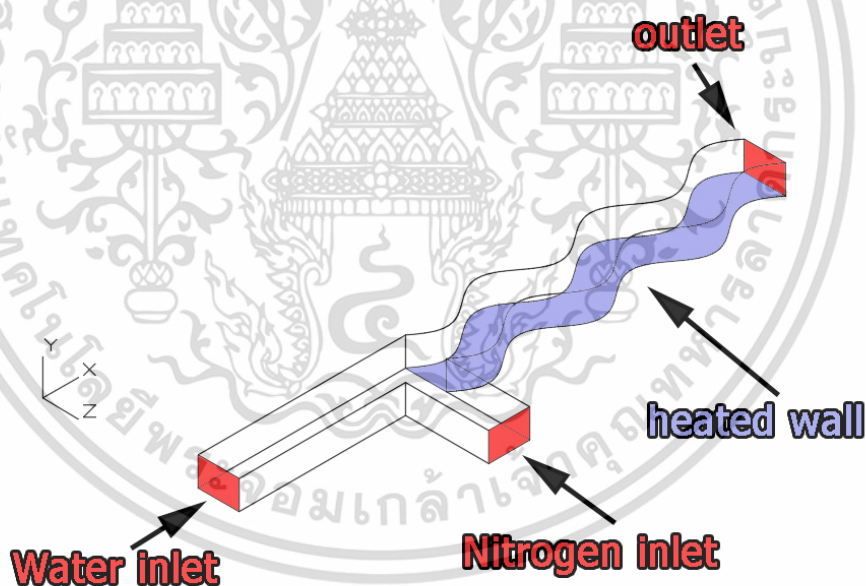
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น 12 แบบจำลอง ดังที่แสดงในตารางที่ 3.5 ในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองทั้งหมด กำหนดความเร็วน้ำเท่ากับ 0.25 m/s และความเร็วไนโตรเจนเท่ากับ 0.07 m/s ส่วนเงื่อนไขอื่น ๆ นั้นเป็น ดังหัวข้อที่ 3.1.1, 3.1.2 และ 3.1.3

ตารางที่ 3.5 แสดงแบบจำลองที่ทำการศึกษา

สารทำงาน	ท่อตรง	ท่อคลื่น		
		แอมพลิจูด 0.1 mm	แอมพลิจูด 0.15 mm	แอมพลิจูด 0.2 mm
น้ำ	✓	✓	✓	✓
น้ำ-ไนโตรเจน	✓	✓	✓	✓
น้ำ-อากาศ	✓	✓	✓	✓

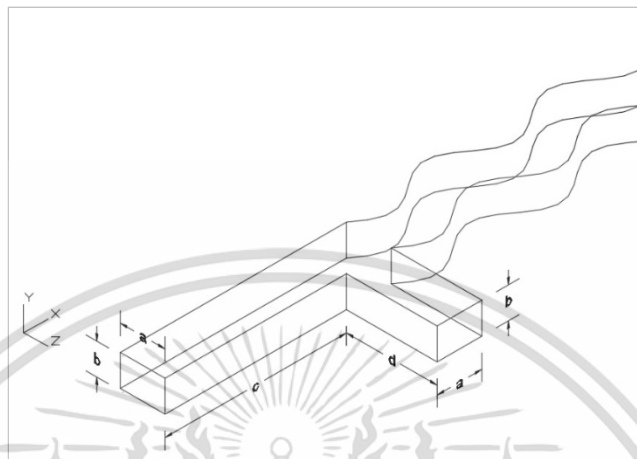


รูปที่ 3.23 แสดงส่วนต่างๆของท่อคลื่น

รูปที่ 3.23 แสดงส่วนต่างๆของท่อคลื่น และขนาดระยะต่างๆเป็นดังรูปที่ 3.24 และตารางที่ 3.5 ตำแหน่งการวัดแอมพลิจูด (A) เริ่มจากจุดสมดุลของท่อคลื่นรูปไซน์ ไปจุดถึงระยะทางสูงสุดของคลื่นดังที่แสดงในรูป 3.25 โดยแบบจำลองท่อคลื่นทำการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดเพื่อศึกษาพฤติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของของไหลสองสถานะ มีแอมพลิจูดทั้งหมด 3 ค่า คือ แอมพลิจูดขนาด 0.2 mm, 0.15 mm และ 0.1 mm



รูปที่ 3.24 แสดงขนาดของแบบจำลองของของไหลสองสถานะในทอคลื่น



รูปที่ 3.25 แสดงตำแหน่งการวัดแอมพลิจูด

ตารางที่ 3.6 แสดงขนาดของตัวแปรในรูปที่ 3.24

ระยะ	ความยาว (mm)
a	0.617
b	0.430
c	2.500
d	1.250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

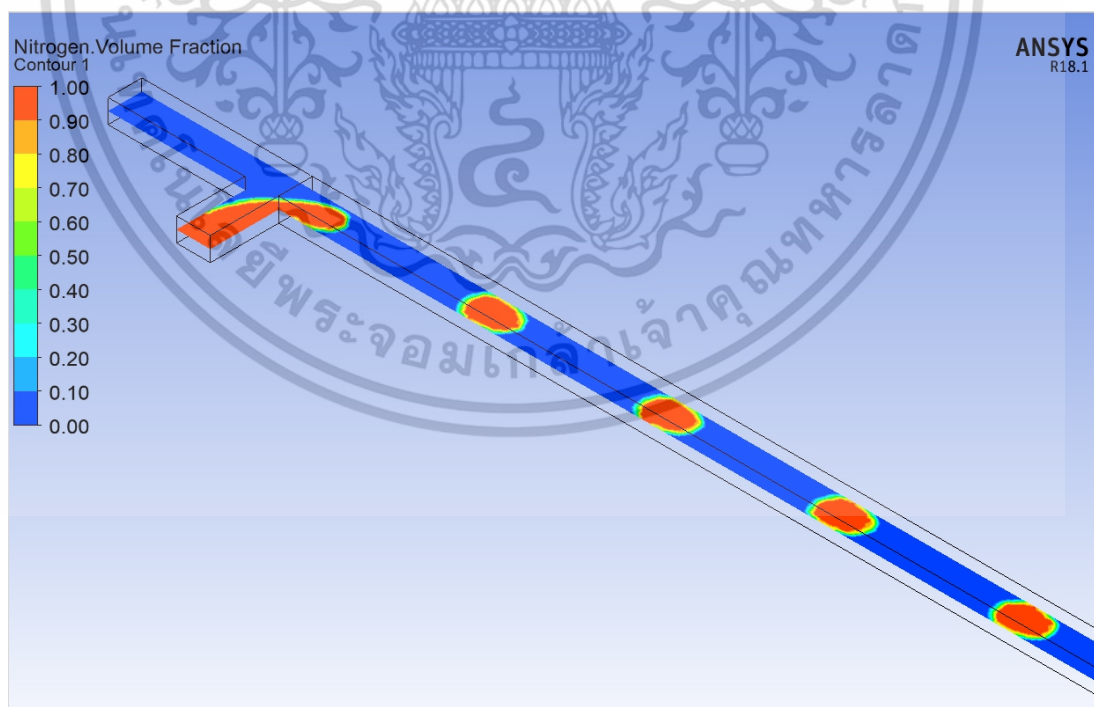
### ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

#### 4.1 การไหลของของไหลในท่อตรง

แบบจำลองการไหลของของไหลในท่อตรงแบ่งได้เป็น 3 แบบจำลอง คือ การไหลแบบสถานะเดียวที่ใช้น้ำเป็นของไหล, การไหลแบบสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจน และการไหลแบบสองสถานะน้ำ-อากาศ ท่อไมโครแชนแนลที่พิจารณามีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 0.507 mm และให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่  $100 \text{ W/cm}^2$  ที่ผิวด้านล่างของท่อ

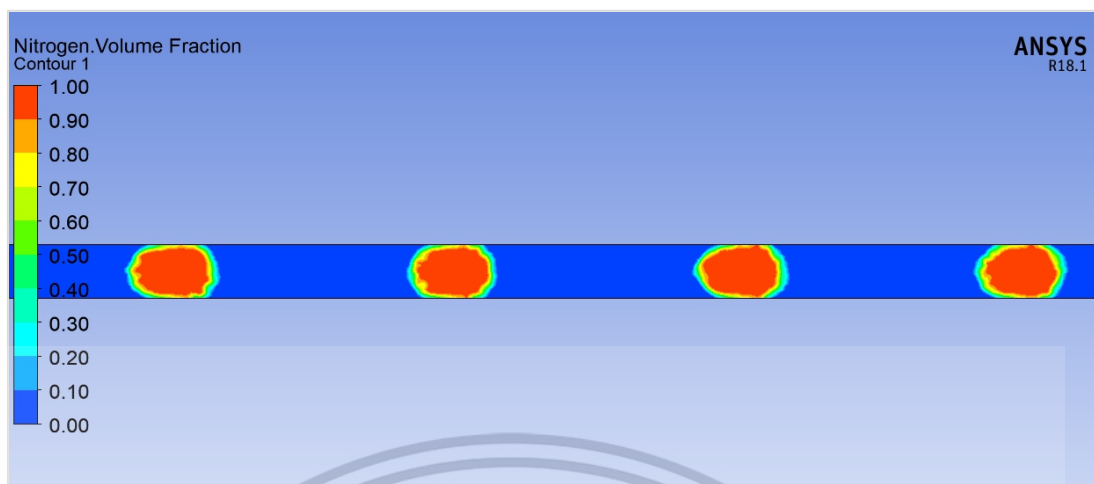
##### 4.1.1 รูปแบบการไหลสองสถานะในท่อตรง

รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลแต่ละสถานะ สำหรับความเร็วที่ทางเข้าของน้ำคือ  $0.25 \text{ m/s}$  และที่ทางเข้าของไนโตรเจนคือ  $0.07 \text{ m/s}$  สามารถจำแนกรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเป็นการไหลแบบ slug flow เนื่องจากความยาวของฟองอากาศมีความยาว  $1.06 \text{ mm}$  ซึ่งมากกว่าความกว้างช่องที่มีความกว้าง  $0.617 \text{ mm}$  [6]



รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

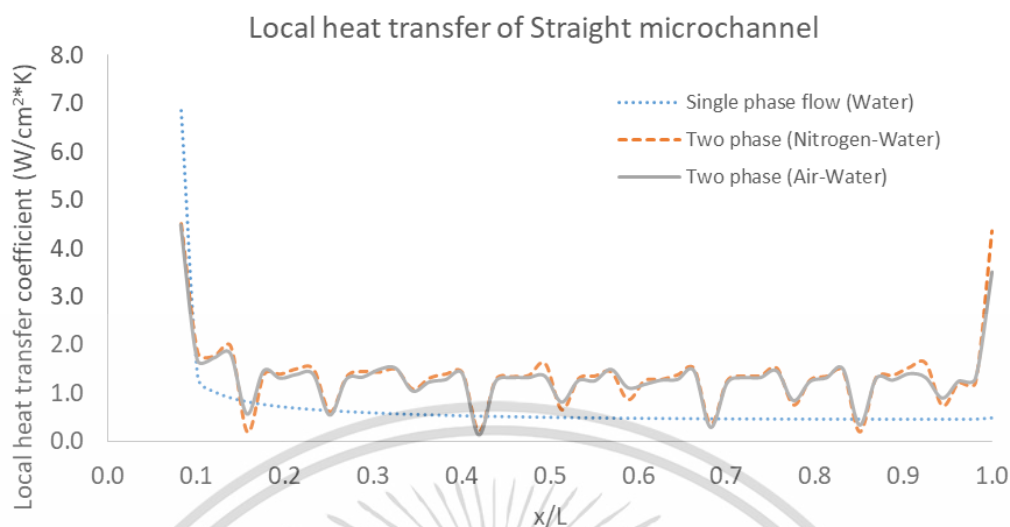


รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะน้ำ-ไนโตรเจนในท่อตรงด้านบน

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น พื้นที่สีแดงหมายถึงพื้นที่ที่มีไนโตรเจนอย่างเดียว พื้นที่สีน้ำเงินหมายถึงพื้นที่ที่มีน้ำอย่างเดียว ส่วนพื้นที่ที่มีสีอื่นหมายถึงพื้นที่ที่มีการผสมกันของน้ำและไนโตรเจน จากรูปอธิบายความหมายทางกายภาพได้ว่า บริเวณทางเข้ารูปตัว T เกิดการผสมกันของน้ำและไนโตรเจนที่รอบนอกเกิดเป็นชั้นผสมกันที่เรียกว่าชั้นฟิล์ม ในขณะเดียวกันไนโตรเจนก็ไหลไปในทิศเดียวกับน้ำ เมื่อถึงจุดหนึ่งไนโตรเจนก็ขาดออกจากกัน จากนั้นไนโตรเจนรอบนอกที่สัมผัสกับน้ำ ก็รวมตัวกับน้ำเกิดเป็นชั้นฟิล์มห่อหุ้มไนโตรเจนไว้ จากนั้นจึงไหลตามท่อไปเรื่อยๆ เรียกการไหลรูปแบบนี้ว่าการไหลแบบ slug flow

#### 4.1.2 การพาความร้อนของของไหลในท่อตรง

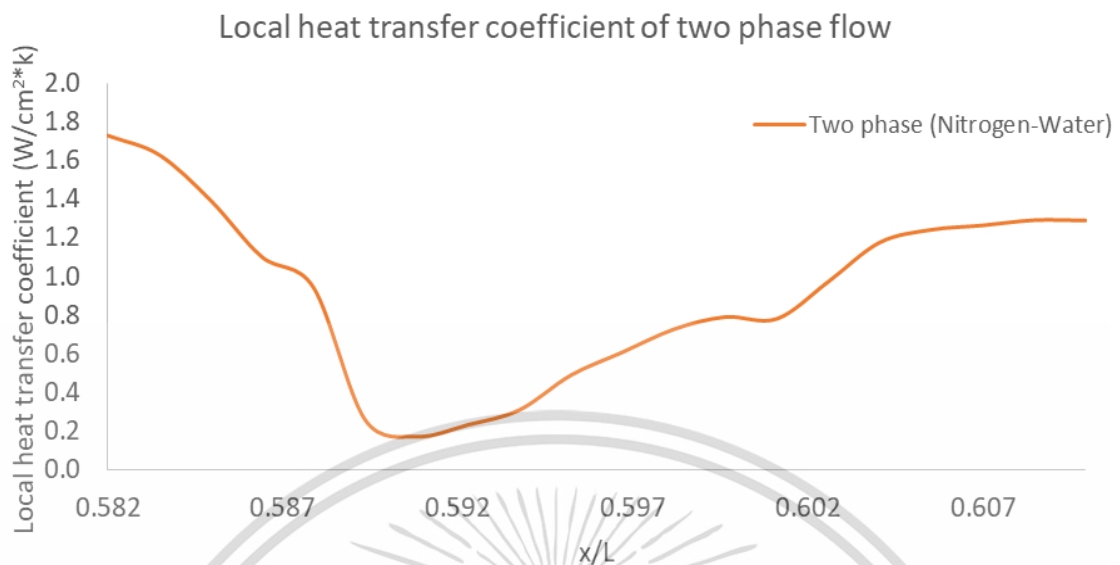
รูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ( $h(x)$ ) โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีการไหลของน้ำในท่อตรง และการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อตรง จากรูปจะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ของกรณีการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำและการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงในช่วงทางเข้าและมีแนวโน้มของกราฟผันผวนตลอดระยะทางของท่อ ในขณะที่การไหลสถานะเดียวมีค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงในช่วงทางเข้าเช่นกันแต่มีแนวโน้มของกราฟลู่ออก



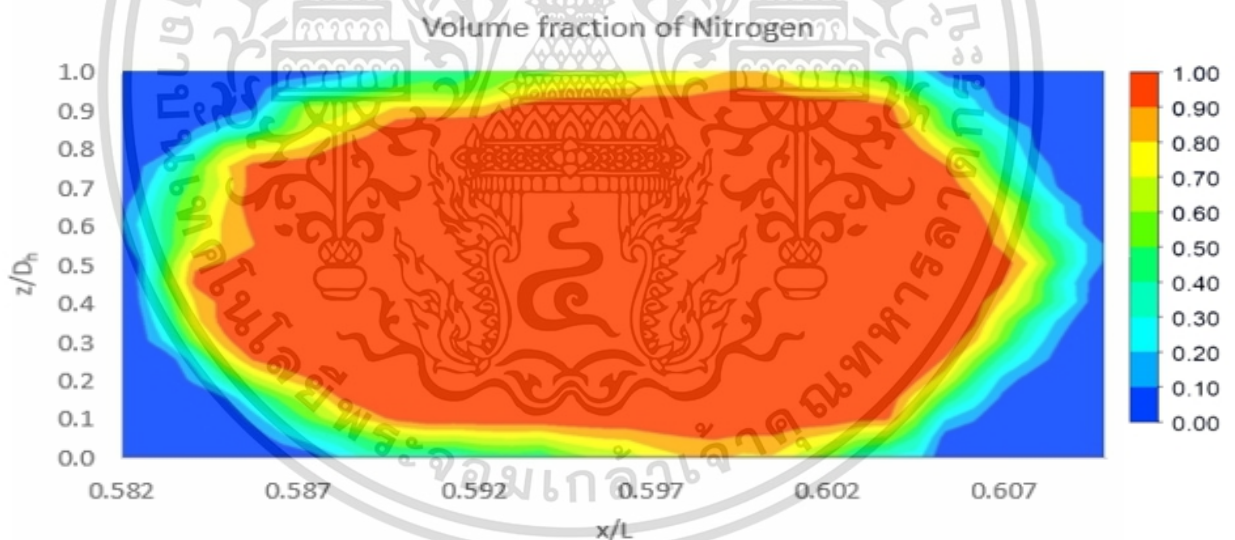
รูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ในท่อตรง

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำ จะเห็นได้ว่าช่วงที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านค่าสัมประสิทธิ์จะลดลงในช่วงกลางฟองอากาศ และเพิ่มสูงขึ้นในช่วงด้านหน้าและท้ายฟองอากาศ จะเห็นแนวโน้มนี้ได้ชัดในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยในการไหลสถานะเดียวเท่ากับ  $0.659 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$  ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยในการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำเท่ากับ  $1.370 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$  ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยในการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำเท่ากับ  $1.335 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$

จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการไหลสองสถานะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่สูงกว่าการไหลสถานะเดียว เนื่องจากการหมุนเวียนของมวลภายในฟองอากาศทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนในแนวรัศมีดีขึ้น เมื่อฟองอากาศเคลื่อนที่ไปตามท่อก็จึงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ยมากขึ้น [1,11 ]

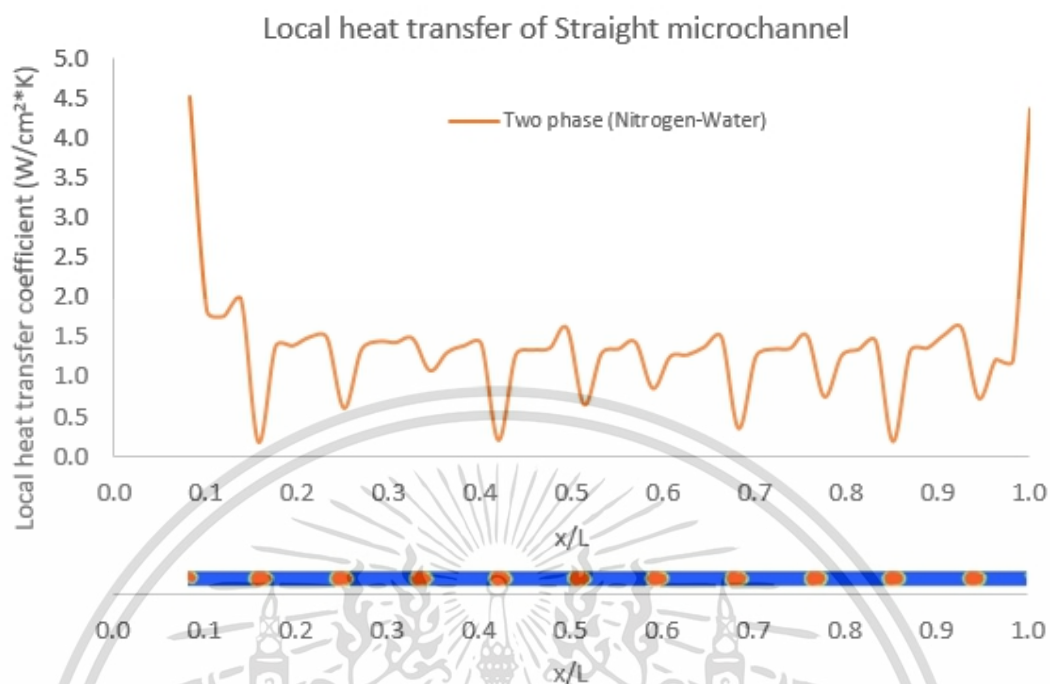


รูปที่ 4.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ระหว่างตำแหน่ง  $x/L$  ที่ 0.582-0.609



รูปที่ 4.5 แสดงสัดส่วนปริมาตรของไนโตรเจนระหว่างตำแหน่ง  $x/L$  ที่ 0.582-0.609

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

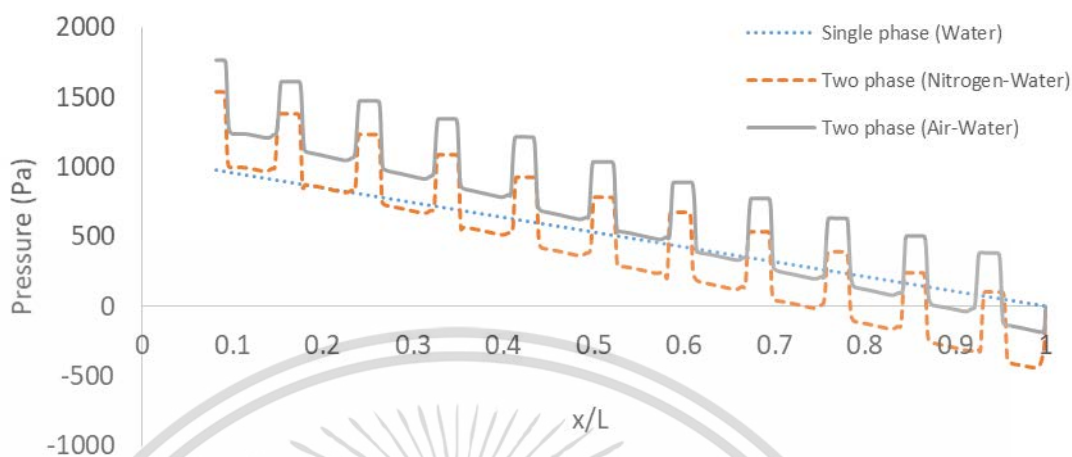


รูปที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำในท่อตรง

#### 4.1.3 ความดันของของไหลในท่อตรง

รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายความดันของของไหลตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อตรงโดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีการไหลของน้ำ, การไหลของไนโตรเจน-น้ำ และการไหลของอากาศ-น้ำ จากรูปจะเห็นว่ากราฟของการไหลสองสถานะทั้งของไหลที่เป็น ไนโตรเจน-น้ำและอากาศ-น้ำ แนวโน้มการกระจายความดันใกล้เคียงกัน ส่วนการไหลสถานะเดียวกราฟจะเป็นเส้นตรงและลดลงไปเรื่อยๆเท่านั้น ในทุกๆกรณีที่ความดันลดลงเรื่อยๆนั้นเป็นผลมาจากความหนืดของของไหลทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่บริเวณผนังท่อ จากสมการที่ 2.3 จะเห็นว่าความดันตกแปรผันตรงกับระยะทางท่อ ดังนั้นยิ่งของไหลเคลื่อนที่ไปมากเท่าใด ความดันก็ยิ่งลดมากขึ้นเท่านั้น การสูญเสียความดันในลักษณะนี้สามารถเรียกได้ว่าเป็นการสูญเสียหลัก (Major loss)

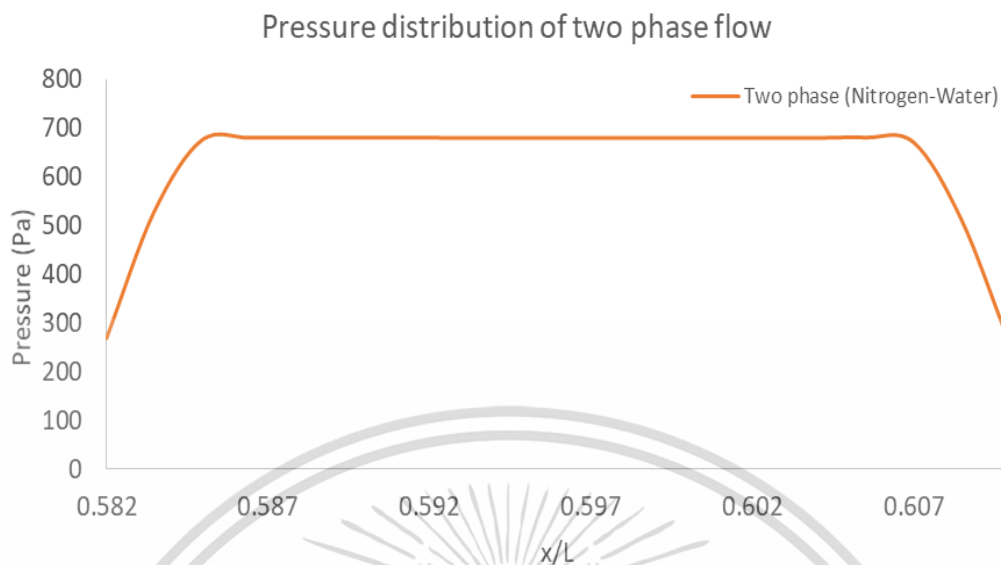
### Pressure distribution in straight microchannel



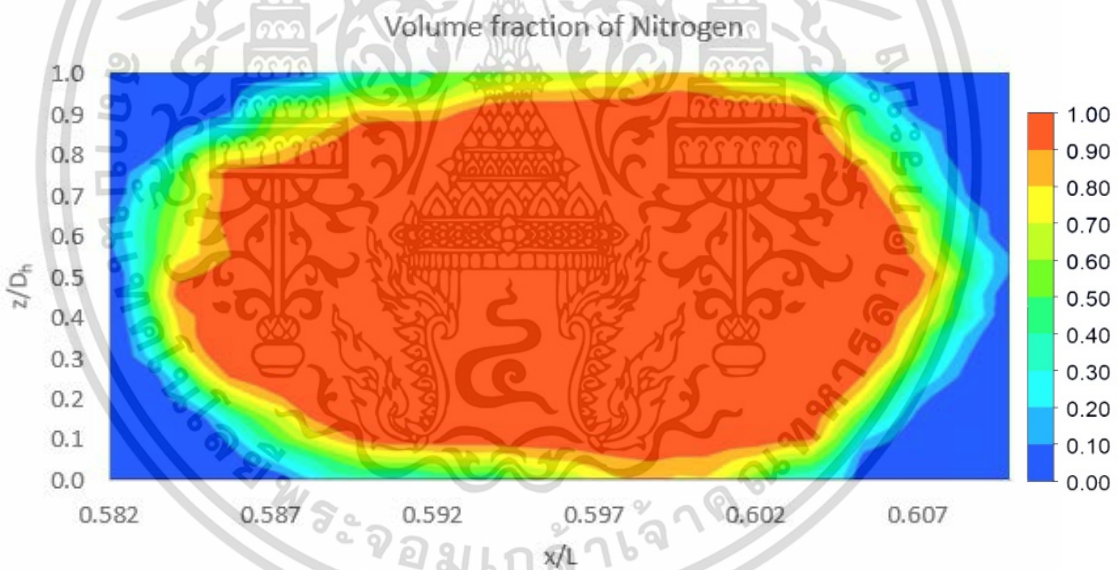
รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายความดันของของไหลตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อตรง

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่าบริเวณกลางฟองอากาศมีความดันที่สูงและความดันเริ่มลดลงบริเวณหัวและท้ายฟองอากาศ ทำให้กราฟมีจุดพีกที่บริเวณกลางฟองอากาศดังที่แสดงในรูปที่ 4.10 เมื่อเกิดฟองจำนวนมากขึ้นทำให้ความดันตกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการไหลสองสถานะจึงมีความดันตกที่มากกว่าการไหลสถานะเดียว ผลการจำลองนี้มีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยของ Choi [2-3] ในงานวิจัยยังเสริมอีกว่า เมื่อเพิ่มความเร็วของไนโตรเจนไปเรื่อยๆ จนทำให้รูปแบบการไหลเป็นช่วง Transition ก่อนจะเป็นช่วงการไหลแบบ Liquid ring flow ในช่วงนั้นฟองอากาศจะเริ่มพังทลาย ทำให้ความดันตกในช่วงนี้ลดลง ก่อนที่จะเพิ่มอีกครั้งในช่วงการไหลแบบ Liquid ring flow

ในการจำลองแบบการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) และการกำหนดค่าความดันดำเนินการ (Operating pressure) เท่ากับ 0 Pa มีโอกาสทำให้เกิดความดันเกจติดลบ เนื่องจากการไล่ระดับความดันในสมการนาเวียร์-สโตก์ เมื่อสมมติค่าความดันเกจที่ทางเข้าแล้วไม่สามารถกลับไปแก้ไขได้ ดังนั้นเมื่อคำนวณระดับความดันเกจมาถึง 0 แล้วแต่การไหลยังไม่สิ้นสุดระบบจะไล่ระดับความดันต่อไปจนเกิดเป็นความดันเกจติดลบ ความผิดพลาดนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อ การจำลองเนื่องจากความดันที่ออกมาเป็นความดันเกจในการหาความดันตกจึงคิดจากความต่างของความดันได้เลย



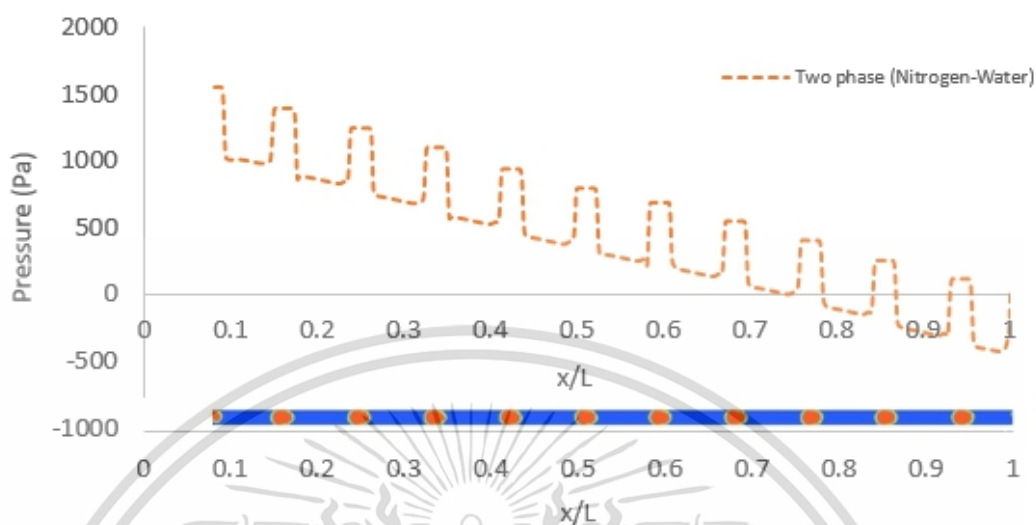
รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายความดันของของไหลระหว่างตำแหน่ง  $x/L$  ที่ 0.582-0.609



รูปที่ 4.9 แสดงสัดส่วนปริมาตรของไนโตรเจนระหว่างตำแหน่ง  $x/L$  ที่ 0.582-0.609

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Pressure distribution in straight microchannel



รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายความดันของของไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำในท่อตรง

## 4.2 การไหลของของไหลในท่อคลื่น

แบบจำลองของการไหลในท่อคลื่น แบ่งได้เป็น 9 แบบจำลอง คือ การไหลในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.2, 0.15 และ 0.1 mm ของการไหลสถานะเดียว, การไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำ และการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของท่อเท่ากับ 0.507 mm และให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่  $100 \text{ W/cm}^2$  ที่ผิวล่างของท่อ

### 4.2.1 รูปแบบการไหลสองสถานะในท่อคลื่น

รูปแบบการไหลในท่อคลื่น เป็นการไหลแบบ slug flow เช่นเดียวกับกับท่อตรงเนื่องจากความเร็วที่ทางเข้าน้ำและทางเข้าไนโตรเจนเท่ากับแบบจำลองท่อตรง ในรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 แสดงรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งของฟองอากาศในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูดเดียวกัน พบว่าระยะทาง  $x/L$  ของฟองอากาศแต่ละฟองค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อเทียบกับท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.15 และ 0.2 mm พบว่าเมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นระยะทาง  $x/L$  ของแต่ละฟองอากาศสั้นลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้จำนวนฟองอากาศมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างฟองอากาศของท่อคลื่นแต่ละแอมพลิจูด พบว่าฟองอากาศแต่ละฟองจะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งรูปร่างของส่วนโค้งนั้นๆ



รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1 mm



รูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.15 mm



รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.2 mm

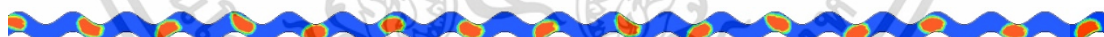
รูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm พบว่าระยะทาง  $x/L$  ของฟองอากาศแต่ละฟองน้อยลงเมื่อแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น ทำให้แอมพลิจูดสูง มีจำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้เป็นเช่นเดียวกับรูปแบบการไหลของไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่น



รูปที่ 4.14 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1 mm



รูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.15 mm

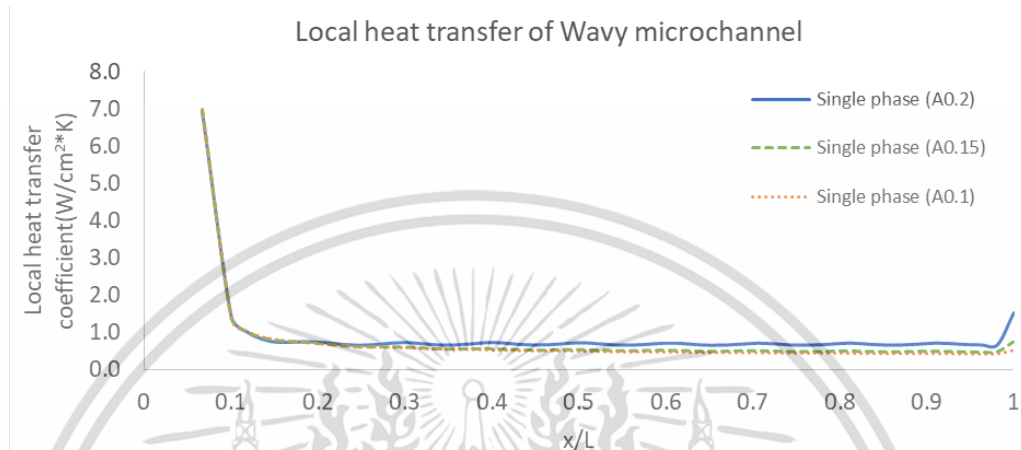


รูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบการไหลของอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.2 mm

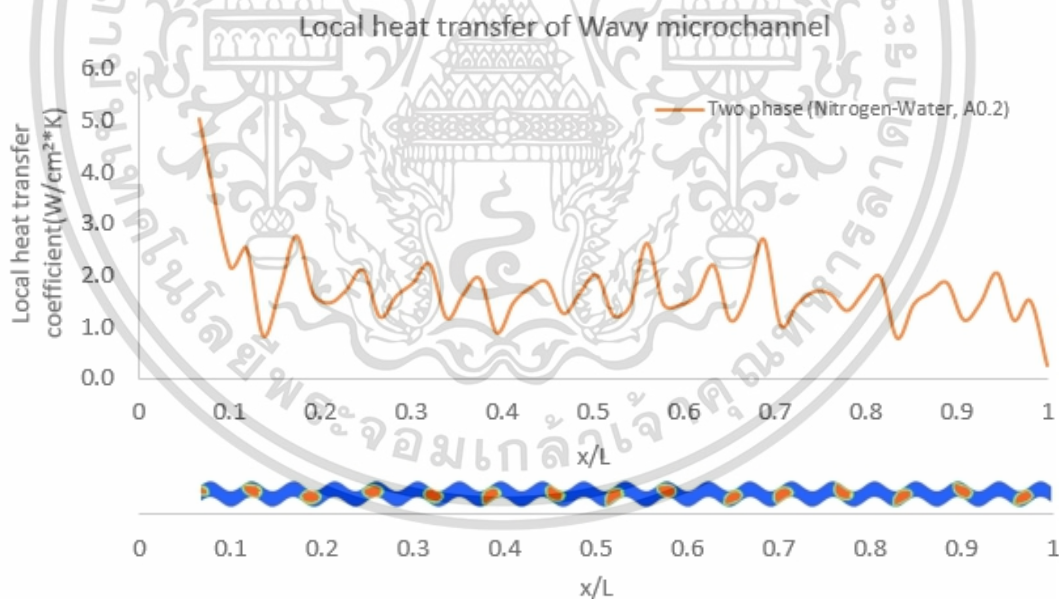
#### 4.2.2 การพาความร้อนของของไหลในท่อคลื่น

รูปที่ 4.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ โดยเปรียบเทียบการไหลของน้ำในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm จากรูปจะเห็นได้ว่า กราฟทั้งหมดมีแนวโน้มลู่ออกเมื่อคำนวณจากสมการที่ 2.6 พบว่า ท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.1 มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ  $0.664 \text{ W/cm}^2\text{K}$  ท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.15 มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ  $0.678 \text{ W/cm}^2\text{K}$  และท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.2 มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ  $0.815 \text{ W/cm}^2\text{K}$  จากผลดังกล่าวทำให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มแอมพลิจูดส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น สำหรับสาเหตุการเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าในขณะที่ของไหล

เคลื่อนที่ไปตามโครงสร้างท่อ เมื่อถึงส่วนโค้งทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขึ้น ของไหลจึงเกิดการกระทบและผสมกันที่ส่วนโค้งด้านนอกของผนังท่อ ทำให้เกิดการกระจายความร้อนและช่วยปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนให้ดีขึ้น [7,10]



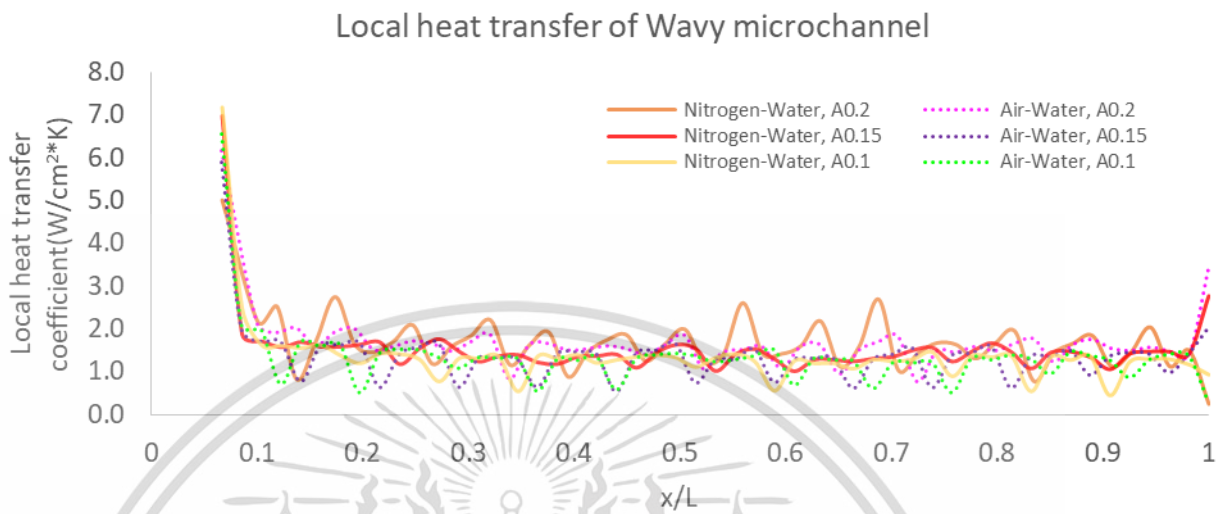
รูปที่ 4.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการไหลสถานะเดียวในท่อคลื่น



รูปที่ 4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำ

รูปที่ 4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.2 mm จากรูปจะเห็นได้ว่า กราฟมีความผันผวนสูงและมีแนวโน้ม

เปลี่ยนแปลงตลอดระยะทาง  $x/L$  สาเหตุของความผันผวนนั้นมาจากการรวม 2 อย่างเข้าด้วยกัน นั่นคือการไหลแบบสองสถานะและรูปร่างท่อที่เป็นรูปคลื่น



รูปที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ โดยเปรียบเทียบระหว่างการไหลของสองสถานะไนโตรเจน-น้ำและการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm พบว่ายิ่งแอมพลิจูดของท่อคลื่นเยอะ ความผันผวนของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ก็มากตามไปด้วย การไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำกับอากาศ-น้ำ กราฟทั้งสองมีแนวโน้มผันผวนเช่นเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของแบบจำลองในหน่วย  $W/cm^2 \cdot K$

สารทำงาน	ท่อตรง	ท่อคลื่น		
		แอมพลิจูด 0.1 mm	แอมพลิจูด 0.15 mm	แอมพลิจูด 0.2 mm
น้ำ	0.659	0.664	0.678	0.815
น้ำ-ไนโตรเจน	1.370	1.375	1.580	1.673
น้ำ-อากาศ	1.335	1.359	1.424	1.680

จากตารางแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของการไหลสถานะเดียวในท่อคลื่นมีค่ามากกว่าท่อตรง เนื่องจากเกิดการผสมกันของของไหลบริเวณผนังท่อ จึงเกิดการกระจาย

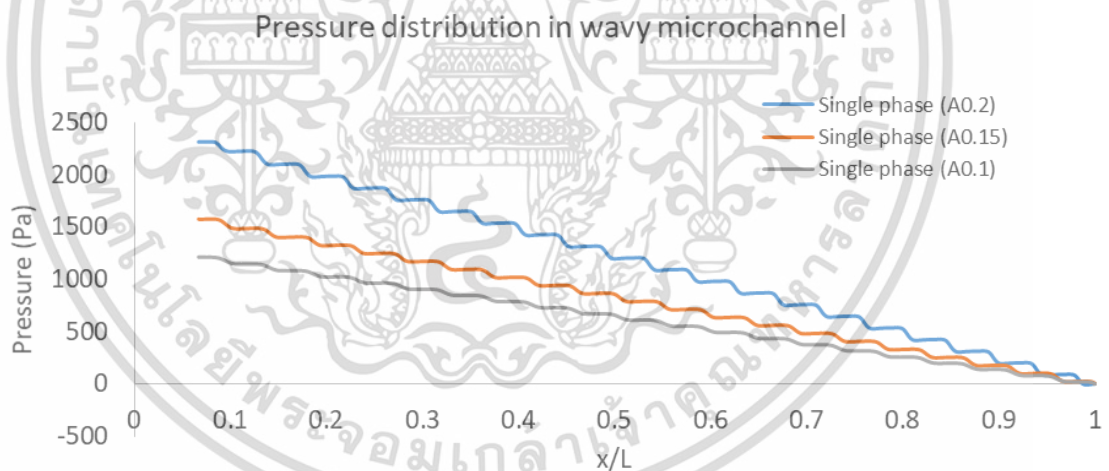
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่ดีกว่าท่อตรง การเพิ่มแอมพลิจูดก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเกิดแรงเหวี่ยงที่มากขึ้น ช่วยให้การผสมกันของของไหลมากขึ้น [10]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไหลสถานะเดียวและสองสถานะ พบว่าการไหลสองสถานะ มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยมากกว่าการไหลสถานะเดียว แต่เมื่อเปรียบเทียบการไหลสองสถานะในโตรเจน-น้ำ และการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

#### 4.2.3 ความดันของของไหลในท่อคลื่น

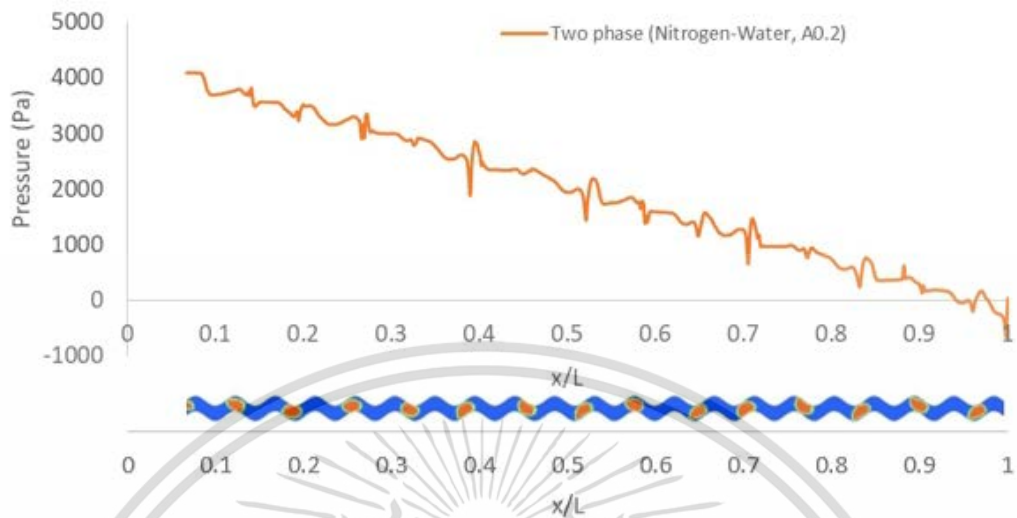
รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายความดันของการไหลสถานะเดียวตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อคลื่น โดยเปรียบเทียบระหว่างท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm พบว่าลักษณะของกราฟในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.2 mm เป็นเส้นหยักและความดันที่ทางเข้าสูงกว่าแอมพลิจูดอื่นๆ แนวโน้มของความดันค่อยๆ ลดลงมาจนถึง 0 Pa ที่ระยะ  $x/L$  เท่ากับ 1 สำหรับเหตุผลนั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับท่อตรงในหัวข้อ 4.1.3



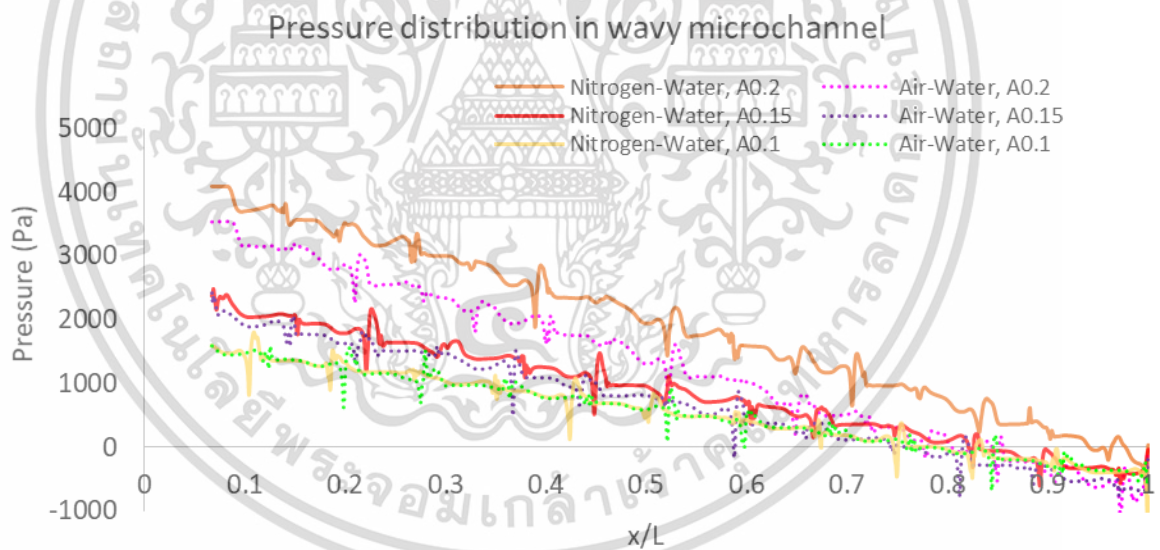
รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายความดันของการไหลสถานะเดียวตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อคลื่น

รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายความดันของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.2 mm พบว่าแนวโน้มของกราฟผันผวนมากขึ้นโดยเฉพาะบริเวณที่เกิดฟองอากาศและความดันที่ทางเข้าสูงกว่าการไหลสถานะเดียวในท่อคลื่นที่แอมพลิจูดเท่ากัน

Pressure distribution in wavy microchannel



รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายความดันของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำในท่อคลื่น  
แอมพลิจูด 0.2 mm



รูปที่ 4.22 แสดงการกระจายความดันของไหลสองสถานะตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อคลื่น

รูปที่ 4.22 แสดงการกระจายความดันของการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำและการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำตามระยะทาง  $x/L$  ในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm พบว่ายิ่งแอมพลิจูดมากขึ้น ความดันที่ทางเข้าก็มากขึ้นตามไปด้วยและเส้นกราฟมีความผันผวนตลอดระยะทาง  $x/L$  เมื่อเปรียบเทียบการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำกับอากาศ-น้ำ พบว่ากราฟมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน สามารถคำนวณความดันตกของท่อคลื่นได้ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความดันตกของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาในหน่วย kPa

สารทำงาน	ท่อตรง	ท่อคด		
		แอมพลิจูด 0.1 mm	แอมพลิจูด 0.15 mm	แอมพลิจูด 0.2 mm
น้ำ	0.983	1.212	1.574	2.307
น้ำ-ไนโตรเจน	1.978	2.893	3.087	4.746
น้ำ-อากาศ	1.953	2.118	3.187	4.698

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเทียบการไหลสถานะเดียวในท่อคดและท่อตรงพบว่าความดันตกในท่อคดมีมากกว่าท่อตรง เนื่องจากรูปร่างคดทำให้ของไหลไม่สามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงได้ จึงต้องเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปตามท่อ ทำให้สูญเสียความดันมากกว่าท่อตรง ยิ่งในท่อคดที่มีแอมพลิจูดสูงความดันตกยิ่งมากขึ้นไปด้วย แนวโน้มนี้เป็นเช่นเดียวกับงานวิจัย [7,10,13]

เมื่อเปรียบเทียบการไหลสถานะเดียวและการไหลสองสถานะพบว่า ความดันตกในการไหลสองสถานะมากกว่าการไหลสถานะเดียว เนื่องจากการเกิดฟองอากาศภายในท่อที่ทำให้ความดันบริเวณนั้นสูงขึ้น ความดันตกจึงมากตามไปด้วยแต่เมื่อเปรียบเทียบการไหลสองสถานะไนโตรเจน-น้ำ และการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ พบว่ามีความดันตกใกล้เคียงกัน

#### 4.3 ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจะต้องแลกมาด้วยความดันตกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้ต้องเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นกับความดันตกที่เพิ่มขึ้น โดย Arya [5] ได้นำเสนอดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน(Performance Index, PI) ไว้ดังสมการที่ 2.13 และแสดงค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน(PI) ของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

สารทำงาน	ท่อตรง	ท่อคด		
		แอมพลิจูด 0.1 mm	แอมพลิจูด 0.15 mm	แอมพลิจูด 0.2 mm
น้ำ	1	0.94	0.88	0.93
น้ำ-ไนโตรเจน	1.65	1.46	1.64	1.50
น้ำ-อากาศ	1.61	1.60	1.46	1.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาการไหลสถานะเดียวในท่อคลื่น พบว่ามีค่า PI ที่น้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพโดยรวมของท่อคลื่นน้อยกว่าท่อตรง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Mills [13] และ Gong [7] ได้ทดลองการไหลในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่ำพบว่าเมื่อเพิ่มตัวเลขเรย์โนลด์ส์ขึ้นประสิทธิภาพโดยรวมของท่อคลื่นก็เพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้ท่อคลื่นควรใช้ในการไหลที่มีอัตราการไหลสูงจึงจะมีประสิทธิภาพที่สูง

เมื่อพิจารณาการไหลสองสถานะ พบว่ามีค่า PI ที่มากกว่า 1 นั้นแสดงให้เห็นว่าการไหลสองสถานะมีประสิทธิภาพโดยรวมมากกว่าการไหลสถานะเดียว แต่เมื่อเปรียบเทียบการไหลสองสถานะในโตรเจน-น้ำ และการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ พบว่าการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำในท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1 mm มีค่า PI มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับสารทำงานแต่ละชนิดกับท่อตรง พบว่าในการศึกษานี้การไหลสองสถานะในท่อตรงมีความคุ้มค่ามากกว่าการไหลในท่อคลื่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของแบบจำลองการไหลสถานะเดียว, การไหลสองสถานะ ไนโตรเจน-น้ำ และการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ ในท่อตรงและท่อคลื่นแอมพลิจูด 0.1, 0.15 และ 0.2 mm ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับการไหลในท่อตรงและท่อคลื่น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและความดันตกของท่อคลื่นมากกว่าท่อตรง เนื่องจากการไหลในท่อคลื่นเกิดแรงเหวี่ยงที่ส่วนโค้งทำให้ของไหลผสมกันได้มากขึ้น จึงเกิดการกระจายความร้อนที่ดีกว่าท่อตรง และด้วยรูปร่างท่อที่เป็นรูปคลื่นซึ่งขัดขวางไม่ให้ของไหลเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจึงเกิดความดันตกมากกว่าท่อตรง ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อท่อคลื่นมีแอมพลิจูดมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและความดันตกก็มากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับการไหลสถานะเดียวและการไหลสองสถานะ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและความดันตกของการไหลสองสถานะมากกว่าการไหลสถานะเดียว เนื่องภายในพองอากาศมีการไหลเวียนของอากาศภายในพองทำให้การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีดีขึ้น และบริเวณพองอากาศมีความดันสูงจึงเป็นเหตุให้การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและความดันตกของการไหลสองสถานะมากกว่าการไหลสถานะเดียว

สำหรับการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่างกันพบว่า ยิ่งแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นจำนวนพองอากาศก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและความดันตกในท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงมีค่าสูงกว่าท่อคลื่นที่มีแอมพลิจูดต่ำ

สำหรับการไหลสองสถานะที่มีสารทำงานเป็นไนโตรเจน-น้ำและอากาศ-น้ำ ในท่อตรงและท่อคลื่น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและความดันตกของทั้งสองมีใกล้เคียงกัน

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกของการไหลสองสถานะภายในท่อคลื่นควรเพิ่มความเร็วที่ทางเข้าหรือ เพิ่มแอมพลิจูดเพื่อดูแนวโน้มประสิทธิภาพโดยรวม ว่ามีประสิทธิภาพดีขึ้นหรือไม่ เนื่องจากงานวิจัยชี้ให้เห็นว่า การไหลสถานะเดียวในท่อคลื่นที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำยังทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำอยู่และยังไม่คุ้มค่ากับการนำไปประยุกต์ใช้

## บรรณานุกรม

- [1] A. Mehdizadeh, S.A. Sherif, W. Lear, Numerical simulation of thermofluid characteristics of two-phase slug flow in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 3457-3465.
- [2] C. Choi, D. Yu, M. Kim, Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios: Part I – Flow pattern, pressure drop and void fraction, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011) 616-624.
- [3] C. Choi, D. Yu, M. Kim, 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 (2011) 1086-1096.
- [4] D. Awad, A.R. Siddiqui, Y. Al-hamidi, M.A. Rahman, I. Hassan, A.N. Experimental Investigation of Air-water Two phase flow regimes in a Horizontal wavy micro-channel, *Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow* (2017) doi: 10.2495/MPF170091
- [5] H. Aryaa, M.M. Sarafraz, O. Pourmehran, M. Arjomandi, Performance index improvement of a double pipe cooler with MgO/water-ethylene glycol(50:50) nanosuspension, *Propulsion and Power Research* 9 (2020) 75-86.
- [6] H. Ganapathy, E. Al-Hajri, M.M. Ohadi, Phase field modeling of Taylor flow in mini/microchannels, Part I: Bubble formation mechanisms and phase field parameters, *Chem. Eng. Sci.* 94 (2013) 138–149.
- [7] L. Gong, K. Kota, W. Tao, Y. Joshi, A.N. Thermal Performance of Microchannels with Wavy Walls for Electronics Cooling, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology* (2011) doi: 10.1109/TCPMT.2011.2125963
- [8] M.M. Awad, Y.S. Muzychka, Effective property models for homogeneous twophase flows, *Exp. Them. Fluid Sci.* 33 (2008) 106–113.
- [9] M. Zunaid, A. Husain, A. Jindal, A. Gupchop, Investigations of Fluid Flow and Convective Heat Transfer in Wavy Micro-Channel at Different Reynolds

- Numbers, International Journal of advanced Production and Industrial Engineering 114(2) (2017) 23-28.
- [10] N. Solehati, J. Bae, A.P. Sasmito, Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure, Computers & Fluids (2014) 10-19.
- [11] P. Suwankamnerd, S. Wongwiset, An experimental study of two-phase air-water flow and heat transfer characteristics of segmented flow in a microchannel, Experimental Thermal and Fluid Science 62 (2015) 29-39.
- [12] Y. Yin, C. Zhu, R. Guo, T. Fu, Y. Ma, Gas-liquid two-phase flow in a square microchannel with chemical mass transfer: Flow pattern, void fraction and frictional pressure drop, International Journal of Heat and Mass Transfer 127 (2018) 484-496.
- [13] Z.G. Mills, A. Wary, A. Alexeev, Heat transfer enhancement and thermal-hydraulic performance in laminar flows through asymmetric wavy walled channels, International Journal of Heat and Mass Transfer 97 (2016) 450-460.