

การศึกษาเชิงตัวเลขคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะภายในท่อ  
สี่เหลี่ยมขนาดเล็ก

A NUMERRICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW CHARACTERISTICS IN  
RECTANGULAR MICRO-CHANNEL



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การศึกษาเชิงตัวเลขคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะภายในท่อ  
สี่เหลี่ยมขนาดเล็ก

A NUMERRICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW CHARACTERISTICS IN  
RECTANGULAR MICRO-CHANNEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A NUMERRICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW CHARACTERISTICS IN  
RECTANGULAR MICRO-CHANNEL



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 LADKRABUNG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะภายในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก

A NUMERRICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW CHARACTERISTICS IN RECTANGULAR MICRO-CHANNEL

ผู้จัดทำ

1. นายเมธี สติรมงคลกุล รหัสประจำตัว 56010983
2. นางสาวสิริพัทธ์ แสงสินศร รหัสประจำตัว 56011324
3. นางสาวอัปสร่า แซ่ตั้ง รหัสประจำตัว 56011258

(ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาเชิงตัวเลขคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะภายในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก

นายเมธี	สถิรมงคลกุล	56010983
นางสาวสิริพัทธ์	แสงสินศร	56011324
นางสาวอัปสร	แช่ตั้ง	56011258
ดร.มจรุส	สุชาติวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2559		

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลสถานะเดียวโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน และของไหลสองสถานะน้ำ-อากาศภายในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ไฮดรอลิก น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $0.115 \text{ mm}$ ) ซึ่งมักจะใช้เป็นฮีทซิงค์สำหรับระบายความร้อนให้แก่อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการศึกษาในของไหลสถานะเดียว-น้ำ พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนด้าน ตั้งแต่  $AR = 3 - 15$  จะส่งผลให้ความดันตกที่เกิดขึ้นสูงขึ้น และความต้านทานความร้อนลดลง โดยการเพิ่มอัตราส่วนด้านจากค่าอัตราส่วนด้านต่ำจะมีอัตราการเพิ่มของค่าความดันตกหรือลดความต้านทานทางความร้อนมากกว่าการเพิ่มอัตราส่วนด้านที่มีค่าสูง โดยการเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 3 ไป 5 จะได้ความดันตกเพิ่มขึ้นมากที่สุด 12% จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านอัตราการเพิ่มของความดันตกจะลดลงจนเหลือ 1% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 13 ไป 15 ในขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 3 ไป 5 จะสามารถลดความต้านทานความร้อนได้มากที่สุดถึง 19% และอัตราความสามารถในการลดค่าความต้านทานความร้อนนี้จะลดลงจนเมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 13 ไป 15 ค่าความต้านทานความร้อนจะลดลงเพียง 4.2%

ต่อมาได้ศึกษาคุณลักษณะของของไหลสองสถานะน้ำ-อากาศ โดยจะศึกษารูปแบบการไหล และความดันตกของของไหลสองสถานะน้ำ-อากาศที่มีรูปร่างของทางเข้าก่อนผสมต่างกัน พบว่าแบบจำลองท่อผสมรูปแบบตัว T ที่ทำมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศเท่ากับ 180 องศา จะมีรูปแบบคล้ายกับแบบจำลองท่อผสมรูปแบบตัว Y ที่ทำมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศเท่ากับ 60 องศา โดยรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นส่วนมากในสองแบบจำลองนี้ คือรูปแบบการไหลที่มีฟองเช่น Elongated Bubble Flow, Slug Bubble Flow และ Bubbly Flow โดยที่แบบจำลองท่อผสมรูปแบบตัว T ที่ทำมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศเท่ากับ 180 องศา จะมีโอกาสเกิดฟองเล็กๆ มากกว่า เนื่องจากมุมทางเข้าที่ทำให้น้ำและอากาศปะทะกันโดยตรง ความดันที่เกิดขึ้นของรูปแบบการไหลแบบเช่น Elongated Bubble Flow, Slug Bubble Flow, Bubbly Flow และ Liquid Ring Flow จะมีค่าใกล้เคียงกับสมการความดันของไหลสองสถานะที่ใช้สมการ McAdams ในการคำนวณความหนืด ในขณะเดียวกัน แบบจำลองท่อผสมรูปแบบตัว T ที่ทำมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศเท่ากับ 90 องศา ที่มีมุมปะทะกันน้อยจะทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ Stratified Flow มากกว่า และความดันตกของรูปแบบการไหลแบบ Stratified Flow จะใกล้เคียงกับสมการความดันของของไหลสถานะเดียว-น้ำ มากกว่าสมการของไหลสองสถานะ

# A NUMERRICAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW CHARACTERISTICS IN RECTANGULAR MICRO-CHANNEL

Maetee Sathiramongkolkul 56010983  
Siripak Sangsinsorn 56011324  
Apsara Saetang 56011258  
Dr. Maturose Suchatawat Advisor  
Year 2016

## ABSTRACT

A numerical study is separated to two parts, the single phase and the two-phase air-water flow in a rectangular micro-channel.

The single-phase part is studied the flow and the heat transfer characteristics. The flow characteristic is represented by the friction factor. Increasing the aspect ratio from 3 to 5, the friction factor values increase in the steeper rate than increasing the aspect ratio from 13 to 15 from 12% to 1 %, respectively. On the other hand, the thermal resistance values decrease when increasing the aspect ratio and decreasing in the lower rate when the aspect ratio is higher such as increasing the aspect ratio from 3 to 5 can decrease 19% of the value of the thermal resistance and increasing the aspect ratio from to 13 to 15 can decrease only 4.2% of the value of the thermal resistance.

The two-phase air-water is conducted to study flow characteristics, the flow patterns and the pressure drop. The 180 degree of water and air inlets T junction mixing model and the 60 degree of water and air inlets Y junction mixing model have similar flow patterns, the almost flow patterns are the bubble flow such as the elongated bubble flow, the slug bubble flow and the bubbly flow. The small bubble flow is easy to occur in The 180 degree of water and air inlet T junction because the angle 180 degree make air and water directly impulse. The pressure drop of the elongated bubble flow, the slug bubble flow, the bubbly flow and the liquid ring flow slightly different between the value of the pressure drop that is calculated by McAdams viscosity flow model. On the other hand, the 90 degree of water and air inlet T junction, the stratified is the most flow pattern that occur in this model. The pressure drop of the stratified flow is near the pressure drop of the water that is calculated by Darcy-Weisbach equation.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และเป็นผู้ตรวจทานต้นฉบับวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณศูนย์บริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ยืมใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อการศึกษาเชิงตัวเลข

ขอขอบคุณ ดร.วิชาดา เจษฎารัตนชัย และ คุณสุกิจ แซ่โอ้ว ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและความรู้ด้านโปรแกรม ANSYS

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆและคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดามารดา ที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ มีคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น

นายเมธี สติรมงคลกุล  
นางสาวสิริพัทธ์ แสงสินศร  
นางสาวอัปสร่า แซ่ตั้ง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XI
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 ของไหลสถานะเดียว.....	5
2.1.1 ลักษณะของการไหล.....	5
2.1.2 การถ่ายเทความร้อน.....	7
2.2 ของไหลสองสถานะ.....	8
2.2.1 รูปแบบการไหล.....	8
2.2.2 ความดันลด.....	9
2.3 วิธีคำนวณเชิงตัวเลข.....	12
2.3.1 การคำนวณเชิงตัวเลขของของไหลสองสถานะด้วยวิธีการแบ่งส่วนปริมาตรของไหล (Volume of Fluid, VOF).....	12
2.3.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน K – Omega SST.....	13



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย	23
4.1 การไหลในท่อด้วยของไหลสถานะเดียว	23
4.1.1 การไหลภายนอกกรุปทรงกระบอกโดยการไหลแบบราบเรียบ	23
4.1.2 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน	33
4.2 การไหลในท่อด้วยของไหลสองสถานะ	35
4.2.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง	35
4.2.1.1 ตัวอย่างรูปแบบการไหลในแต่ละแบบจำลอง	35
4.2.1.2 แผนภูมิแสดงรูปแบบการไหล	43
4.2.2 ความดันลดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง	46
4.2.2.1 แสดงค่าความดันลดที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยความยาวในเงื่อนไขแสดง ความเร็วทางเข้าน้ำและอากาศที่แตกต่างกัน	47
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการศึกษา	52
5.1.1 การศึกษาคุณลักษณะการไหลและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของ ไหลสถานะเดียวโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ	52
5.1.2 คุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะน้ำ-อากาศ	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงขนาดของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาของไหลสถานะเดียว.....	17
3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความยาวฟองอากาศ (Slug Length) ระหว่างการทดลองของ Santos และ Kawaji [8] และแบบจำลองปัจจุบัน.....	26
3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด (Pressure Drop) ระหว่างการทดลองของ Santos และ Kawaji [8] และแบบจำลองปัจจุบัน.....	27
4.1 แสดงค่าตัวประกอบความเสียหายที่ได้จากค่าการแก๊สมการ Darcy–Weisbach ซึ่งใช้ค่าความดันลดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเสียหายที่ได้ของการไหลแบบปรับตัวแล้วเต็มที่ (Fully Developed) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนด้านจากการศึกษาของ Shah และ London (1978).....	29
4.2 แสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในหน่วย kPa/m ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศา กับทางเข้าของน้ำ.....	47
4.3 แสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในหน่วย kPa/m ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ.....	47
4.4 แสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในหน่วย kPa/m ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศา กับทางเข้าของน้ำ.....	48

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปแบบการไหล น้ำ – อากาศ (a) Bubble Flow, (b) Slug Bubble Flow, (c) Elongated Bubble Flow, (d) Stratified Flow, (e) Liquid Ring Flow, (f) Multiple Flow จากการศึกษาของ Choi และคณะ (2010) .....	8
2.2 แสดงภาพการแบ่งอิลิเมนต์บริเวณที่ติดกันของของไหลสองสถานะ โดยภาพ (a) แสดงรูปร่างที่จริง (b) แสดงการด้วยวิธีการ Geometric Reconstruction Scheme .....	12
2.3 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE โดย กิริติ (2010) .....	14
2.4 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ PISO โดย กิริติ (2010).....	15
3.1 เครื่องมือที่ใช้วาดแบบจำลองภายในโปรแกรม ANSYS .....	16
3.2 แสดงแบบจำลองของไหลสถานะเดียวที่ใช้ในการคำนวณ .....	17
3.3 การกำหนดจำนวนของอิลิเมนต์ของแบบจำลอง .....	18
3.4 กำหนดค่าความเร็วทางเข้าของของไหลที่คำนวณมาจากสมการเรย์โนลด์นัมเบอร์ .....	18
3.5 การตั้งค่าสำหรับการคำนวณแบบ SIMPLE.....	19
3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความดันตกของของไหลระหว่างผลการศึกษาของ Wang [2] กับ ผลการศึกษาที่ 908,352 เอลิเมนต์, 1,160,000 เอลิเมนต์, 1,768,608 เอลิเมนต์.....	20
3.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างผลการศึกษาของ Wang [2] กับผลการศึกษาปัจจุบัน .....	20
3.8 แบบจำลอง 3 มิติ แบบที่ 1.....	21
3.9 แสดงขนาดของแบบจำลองแบบที่ 1 มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร ( $\mu m$ ).....	22
3.10 แบบจำลอง 3 มิติ แบบที่ 2.....	22
3.11 แสดงขนาดของแบบจำลองแบบที่ 2 มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร ( $\mu m$ ) .....	22
3.12 แบบจำลอง 3 มิติ แบบที่ 3 .....	23
3.13 แสดงขนาดของแบบจำลองแบบที่ 3 มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร ( $\mu m$ ) .....	23
3.14 การกำหนดขนาดของอิลิเมนต์ .....	24
3.15 กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง (a) ตั้งค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำ – อากาศ, (b) ตั้งค่าความเร็วของน้ำ ตั้งแต่ 0.08 – 8 m/s, (c) ตั้งค่าความเร็วของอากาศตั้งแต่ 0.08 – 8 m/s.....	25
3.16 การตั้งค่าสำหรับการคำนวณแบบ PISO .....	25
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับตัวเลขเรย์โนลด์ ที่อัตราส่วนด้านตั้งแต่ 3-15.....	28
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานการไหลกับตัวเลขเรย์โนลด์ที่อัตราส่วนด้าน ตั้งแต่ 3-15.....	32

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนที่อัตราส่วนด้านตั้งแต่ 3-15 .....	33
4.4 แสดงรูปแบบการไหลหลักที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศากับทางเข้าของน้ำ (a) Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 8 m/s (b) Slug Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.08 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Elongated Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) Stratified Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.2 m/s.....	36
4.5 แสดงรูปแบบการไหลแบบ Multiple Flow ที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศากับทางเข้าของน้ำ (a) Multiple Bubbly – Stratified Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 8 m/s (b) Multiple Slug – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Multiple Slug - Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (d) Multiple Slug – Stratified Flow Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.08 m/s.....	37
4.6 แสดงรูปแบบการไหลหลักที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศากับทางเข้าของน้ำ (a) Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 8 m/s (b) Slug Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.08 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Elongated Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) Stratified Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.08 m/s (e) Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.2 m/s .....	39
4.7 แสดงรูปแบบการไหลแบบ Multiple Flow ที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศากับทางเข้าของน้ำ (a) Multiple Slug – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (b) Multiple Slug - Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 4 m/s.....	40
4.8 แสดงรูปแบบการไหลหลักที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศากับทางเข้าของน้ำ (a) Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 2 m/s (b) Slug Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.08 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Elongated Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.2 m/s.....	41

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงรูปแบบการไหล Multiple Flow ที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาับทางเข้าของน้ำ (a) Multiple Slug – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.8 m/s (b) Multiple Slug - Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 4 m/s (c) แสดงภาพตัดกึ่งกลางท่อตามแนวยาวของการไหล Multiple Stratified – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) แสดงภาพสามมิติแบบไอโซเมตริกการไหล Multiple Stratified – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.4 m/s .....	42
4.10 แสดงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วน้ำและความเร็วอากาศต่างกันของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศาับทางเข้าของน้ำ.....	43
4.11 แสดงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วน้ำและความเร็วอากาศต่างกันของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศาับทางเข้าของน้ำ.....	44
4.12 แสดงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วน้ำและความเร็วอากาศต่างกันของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาับทางเข้าของน้ำ.....	45
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันของของไหลสองสถานะ โดยแบ่งเป็นสี่จุดแสดงถึงรูปแบบการไหลที่แตกต่าง และความดันลดของของไหลสถานะเดียว-น้ำ เทียบที่เลขเรย์โนลด์ต่างกัน ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศาับทางเข้าของน้ำ.....	49
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันของของไหลสองสถานะ โดยแบ่งเป็นสี่จุดแสดงถึงรูปแบบการไหลที่แตกต่าง และความดันลดของของไหลสถานะเดียว-น้ำ เทียบที่เลขเรย์โนลด์ต่างกัน ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศาับทางเข้าของน้ำ.....	50
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันของของไหลสองสถานะ โดยแบ่งเป็นสี่จุดแสดงถึงรูปแบบการไหลที่แตกต่าง และความดันลดของของไหลสถานะเดียว-น้ำ เทียบที่เลขเรย์โนลด์ต่างกัน ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาับทางเข้าของน้ำ.....	51

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่ผิวหน้าตัดของท่อ, $m^2$
$A_b$	พื้นที่ผิวหน้าตัดที่ถูกให้ความร้อน, $m^2$
$f$	ตัวประกอบเสียดทาน
$f_{TP}$	ตัวประกอบเสียดทานของไหลสองสถานะ
$G$	ฟลักซ์มวลของไหล, $kgm/s$
$L$	ความยาวท่อ, $m$
$\dot{m}_L$	อัตราการไหลเชิงมวลของเหลว $kg/s$
$\dot{m}_G$	อัตราการไหลเชิงมวลแก๊ส $kg/s$
$\dot{m}_{pq}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงมวลจากของไหล $p$ ไป $q$ , $kg/s$
$\dot{m}_{qp}$	อัตราการเปลี่ยนแปลงเชิงมวลจากของไหล $q$ ไป $p$ , $kg/s$
$P$	เส้นรอบรูป, $m$
$P$	ความดัน, $N/m^2$
$\dot{Q}$	ฟลักซ์ความร้อน, $W/m^2$
$Re$	เลขเรย์โนลด์
$Re_{TP}$	เลขเรย์โนลด์ของไหลสองสถานะ
$R_{th}$	ค่าความต้านทานความร้อน, $W/K$
$V$	ความเร็วทางเข้าท่อ, $m/s$
$\vec{V}_q$	เวกเตอร์ความเร็วของไหลชนิด $q$
$T_b$	อุณหภูมิพื้นผิวที่ถูกให้ความร้อน, $K$
$T_{in}$	อุณหภูมิทางเข้าของไหล, $K$
$t$	เวลา, $s$
$X$	คุณภาพไอ
$\alpha$	อัตราส่วนด้าน
$\alpha_q$	อัตราส่วนปริมาตรของไหลชนิด $q$
$\rho$	ความหนาแน่น, $kg/m^3$
$\rho_{TP}$	ความหนาแน่นของไหลสองสถานะ, $kg/m^3$
$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์, $Ns/m^2$
$\mu_{TP}$	ความหนืดสัมบูรณ์ของไหลสองสถานะ, $Ns/m^2$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทุกวันนี้โลกได้มีพัฒนาการไปอย่างรวดเร็ว มีการคิดค้น และออกแบบนวัตกรรมใหม่ ๆ ขึ้นมากมายอยู่ตลอดเวลา ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆก็ได้ถูกออกแบบ และพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงขึ้นเรื่อย ๆ โดย ปัญหาในเรื่องของการระบายความร้อนเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก เพราะการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีความสามารถในการทำงานมากขึ้น ทำให้เกิดความร้อนที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งความร้อนเหล่านี้สามารถทำให้ระบบเสียหายได้ ดังนั้นการระบายความร้อนจึงเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดการคิดค้นนำเอาไมโครแชนแนล ( Micro-channels ) มาช่วยในการระบายความร้อน

โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของการไหลของของไหลสถานะเดียวและศึกษารูปแบบการไหลและความดันลดของของไหลสองสถานะ ( น้ำและอากาศ) วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถนำผลการศึกษาไปช่วยในการออกแบบไมโครแชนแนลและออกแบบรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่ดียิ่งขึ้น อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายประเภท เช่น การระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็ก รวมถึงเครื่องมือทางการแพทย์ เซลล์เชื้อเพลิง วิศวกรรมชีวภาพ อีกด้วย ซึ่งผู้ศึกษาหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในภายภาคหน้าสืบไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและหาขนาดความดันลดที่เกิดขึ้นจากการไหลของน้ำผ่านท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนด้าน (Aspect ratio) ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของของไหลสถานะเดียว
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของการไหลสองสถานะ น้ำ – อากาศ ในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก
4. ศึกษาผลของรูปแบบของทางเข้าท่อ ที่มีต่อคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะ

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

#### 1.3.1 ของไหลสถานะเดียว

1.ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของของไหลสถานะเดียว โดยกำหนดความเร็วทางเข้าของน้ำด้วย  $Re$ , กำหนดให้อุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ  $288.15\text{ K}$ , ให้ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ตลอดพื้นที่เท่ากับ ที่บริเวณพื้นที่ผิวด้านล่างของไมโครแชนแนลและกำหนดพื้นที่ผิวด้านนอกของไมโครแชนแนลไม่มีการสูญเสียความร้อน (Adiabatic Wall)

2.ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันลด เนื่องจากการเปลี่ยนอัตราส่วนด้าน (Aspect ratio)

#### 1.3.2 ของไหลสองสถานะ

1.ศึกษารูปแบบการไหลและความดันลดของของไหลสองสถานะ (น้ำ – อากาศ) โดยกำหนดความเร็วทางเข้าของน้ำและอากาศ ตั้งแต่  $0.08$  ถึง  $8\text{ m/s}$  และศึกษารูปแบบการไหลและความดันลดของของไหลสองสถานะ (น้ำ – อากาศ) เนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปแบบทางเข้าของท่อ

### 1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1.4.1 ของไหลสถานะเดียว

Qu และคณะ (2002) ได้ทดลองและจำลองลักษณะทางความร้อนของฮีทซิงค์แบบท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กโดยใช้ฮีทซิงค์ที่ทำมาจากทองแดงและปิดด้วยแผ่นพลาสติกโพลีคาร์บอเนต โดยการศึกษาเน้นศึกษาเพียงแค่อุณหภูมิที่สี่เหลี่ยมขนาดเล็กเพียงอันเดียว โดยมีขนาดความกว้างของท่อขนาด  $231$  และความสูงของท่อขนาด  $713$  เปลี่ยนค่า  $Re$   $139$  ถึง  $1672$  และมีค่าความร้อนต่อพื้นที่ที่กระทำต่อพื้นที่ผิวด้านล่างของ ฮีทซิงค์คงที่เท่ากับ  $100$  ซึ่งได้แสดงพื้นผิวแสดงค่า (Contour) ของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในจุดต่างๆ ที่ค่า  $Re$   $900$  ค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ทั้งด้านล่างและด้านข้างจะมีค่าสูงก่อนจะค่อยๆ ลดลงเป็นเส้นตรงตลอดทั้งความยาว นอกจากนี้ยังสรุปผลว่าทั้งการศึกษาเชิงตัวเลขและการทดลองมีผลออกมาในแนวโน้มเดียวกัน ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผ่านกลางของไหล และพื้นผิวต่างๆ มีลักษณะค่อนข้างตรง

Wang และคณะ (2016) พบว่าตัวแปรของขนาดท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่มีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number,  $Re$ ), อัตราส่วนท่อ (aspect ratio,  $AR$ ) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter, ) โดยการศึกษาดังกล่าวไม่สนใจผลกระทบของ entrance length ซึ่งเมื่อเทียบกับการทดลองของ Qu และคณะ ให้ผลสอดคล้องกันว่า เมื่อเพิ่ม  $Re$  ในตอนแรกความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistance) ลดลงอย่างรวดเร็วก่อนจะค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ส่วนต่างอุณหภูมิค่าใดค่าหนึ่ง สำหรับ  $AR$  ใช้การศึกษาจากการปรับเปลี่ยนขนาดด้วยโปรแกรมการจำลอง โดย ยังมีขนาดลดลงยิ่งทำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ความต้านทานทางความร้อน ลดลงด้วย ในทางกลับกันการลด AR ลงทำให้ความต้านทานทางความร้อนของไหลเพิ่มขึ้น โดยการศึกษาดังกล่าวมีเงื่อนไข AR อยู่ในช่วงมากกว่า 1 เท่านั้น และสรุปผลของอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กได้ว่า ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กจะเกิดขึ้นที่อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมเท่ากับ 8.904-11.442 เนื่องจากเป็นช่วงที่มีความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistance, ) ต่ำที่สุด

Xie และคณะ (2008) พบว่าความกว้างและความสูงของท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กมีผลต่อคุณลักษณะของความต้านทานของร้อนและความดันลด โดยเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อสี่เหลี่ยมจะทำความต้านทานลดลงเมื่อความสูงของท่อเพิ่มขึ้นและความต้านทานทางความร้อนลดลงเช่นกัน หากเพิ่มความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กจะทำความต้านทานลดลงแต่ความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น

#### 1.4.2 ของไหลสองสถานะ

Saisorn และ Wongwises ( 2015 ) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบสองสถานะระหว่างอากาศกับน้ำภายในท่อไมโครแชนแนลที่มีการวางตัวในแนวตั้งและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.53 มิลลิเมตร โดยได้ทำการทดลองการไหลแบบไหลขึ้นในแนวตั้งภายใต้สภาวะที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน โดยพบว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะเงื่อนไขของการทดลองมีความแตกต่างกัน ซึ่งจากการสังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นพบว่ามีรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบ Slug Flow การไหลแบบ Throat-Annular Flow การไหลแบบ Churn Flow การไหลแบบ Annular Flow และการไหลแบบ Annular-Rivulet flow สำหรับการไหลแบบ Throat-Annular Flow เป็นรูปแบบการไหลที่สามารถพบได้เฉพาะกับการไหลในท่อไมโครแชนแนลเท่านั้น ในส่วนของความดันลดก็พบว่าค่าความดันลดที่เกิดจากความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการไหลแบบ Churn Flow นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบข้อมูลของรูปแบบการไหลที่ได้จากการทดลองกับข้อมูลของรูปแบบการไหลที่ได้จากการทดลองในปี ( 2008 ) ซึ่งเป็นการทดลองในลักษณะเดียวกันแต่เป็นในกรณีของการไหลในแนวระดับ โดยพบว่ารูปแบบการไหลในกรณีของการไหลขึ้นในแนวตั้งและการไหลในแนวระดับมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ก็มีความแตกต่างกันในบางประการ คือ 1. ผลของทิศทางการไหลส่งผลให้เส้นรอยต่อระหว่างเฟส ( Gas-Liquid interface ) สำหรับการไหลแบบ Slug Flow มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าในกรณีของการไหลในแนวระดับ รูปร่างของฟองแก๊ส ( Gas Slug ) จะมีลักษณะเหมือนกับกระสุน ( Bullet-Shaped Gas Slug ) แต่ในกรณีของการไหลขึ้นในแนวตั้งรูปร่างฟองแก๊สจะมีลักษณะไม่เหมือนกับกระสุน ( Non-Bullet-Shaped Gas Slug ) 2. ที่สภาวะเงื่อนไขของการทดลองเดียวกันจะพบการไหลแบบ Annular Flow เฉพาะในกรณีของการไหลขึ้นในแนวตั้งเท่านั้น

Chiwoong Choi และ Moohwan Kim ( 2011 ) ได้ทำการศึกษาการไหลแบบสองสถานะในระบบปิดของน้ำและก๊าซไนโตรเจนในท่อโมโครแซนแนลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพบว่ารูปแบบการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบBubble Flow, Liquid Ring Flow และ transition ระหว่างElongated Bubble Flow และ Liquid Ring Flow ซึ่งรูปแบบการไหลนั้นมีผลต่อค่าPressure dropเป็นอย่างมาก

Pansunee (2015) ได้ทำการศึกษาการไหลสองสถานะในท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงขนาด 267 ในการทดลองดังกล่าวได้เกิดรูปแบบการไหลแตกต่างกันได้แก่ Segmented Flow, Throat-Annular, Throat-Annular Liquid, และ Annular โดยใช้สมการสมมุติแบบจำลองการไหลของไหลสองสถานะให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันและ รูปแบบการไหลแบบแยกส่วนในการทำนายความดันลด

Santos และ Kawaji (2011) ได้ทำแบบจำลองเชิงตัวเลขและได้ทำการทดลองการไหลของท่อผสมแบบตัว T เกือบจตุรัส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 113 ซึ่งในการศึกษาเชิงตัวเลขได้ใช้วิธี VOF (Volume of fluid) ซึ่งความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโพรง (Void Fraction) มีลักษณะเป็นเส้นตรงกับอัตราส่วนโพรงของของไหลที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Void Fraction) ในขณะที่การทดลองอัตราส่วนโพรงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็วอากาศต่อความเร็ว น้ำ ยังมีความเร็วเลื่อนมาก (Slip Velocity) จะทำให้ค่าของการทดลองและการศึกษาเชิงตัวเลขมีค่าแตกต่างกันมาก และได้ทำแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อเป็นมาตรฐานในการศึกษา (Benchmark) การไหลสองสถานะของแก๊สและของเหลวที่มีลักษณะการไหลแบบ Slug Flow ที่เกิดจากการวางท่อผสมตัว T แบบตั้งฉากกัน โดยผลกระทบบของอัตราการไหลที่มีผลต่อตัวแปรต่างๆเช่น ความยาวฟองอากาศ (Slug Length), ความเร็วเลื่อน, อัตราส่วนโพรง และความดันลด

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ของไหลสถานะเดียว

#### 2.1.1 ลักษณะของการไหล

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number,  $Re$ ) จะสามารถบอกได้ว่าการไหลเกิดขึ้นในท่อนั้นเป็นแบบใด โดยค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยที่  $V$  คือ ความเร็วที่ทางเข้าของของไหล,  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล,  $\mu$  คือ ค่าความหนืดของของไหล และ  $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการอธิบายลักษณะของการไหลที่เกิดขึ้น โดยการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำจะแสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดจากความหนืด (Viscous Forces) มีผลต่อการเคลื่อนที่ของของไหล ทำให้การไหลมีลักษณะราบเรียบ ส่วนการไหลที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงจะแสดงให้เห็นว่าแรงที่เกิดจากความเฉื่อย (Inertial Forces) มีผลต่อการเคลื่อนที่ของของไหลค่อนข้างมาก ในขณะที่ผลของความหนืดมีค่อนข้างน้อย ทำให้การไหลของของไหลมีความปั่นป่วนค่อนข้างสูง ซึ่งทั่วไปแล้วเกณฑ์ที่ใช้แบ่งลักษณะของการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$Re < 2300$	การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)
$2300 \leq Re \leq 4000$	การไหลในช่วงเปลี่ยนผ่าน (Transitional Flow)
$Re > 4000$	การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการไหลแบบราบเรียบจะอยู่ในช่วงที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 2300 และท่อเหลี่ยมสามารถหาเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกได้จากสมการ

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.2)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อที่สัมผัสกับของไหล และ  $P$  คือ เส้นรอบรูปของท่อที่สัมผัสกับของไหล

โดยค่าความดันลดสามารถคำนวณได้จากสมการของ Darcy-Weisbach ดังต่อไปนี้

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

โดยที่  $f$  คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน,  $L$  คือ ความยาวของไมโครแชนแนล และ  $V$  คือ ความเร็วที่ทางเข้าของของไหล

สำหรับค่าตัวประกอบความเสียดทาน ในกรณีการไหลแบบราบเรียบที่มีการพัฒนาเต็มที่ (Fully Develop Laminar Flow) และอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) ผ่านท่อที่มีหน้าตัดกลมสามารถหาได้จากสมการของ Hagen-Poiseuille ดังต่อไปนี้

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.4)$$

ในกรณีของการไหลผ่านท่อที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมสามารถหาได้จากสหสัมพันธ์ของ Shah and London (1978) ซึ่งได้นำเสนอสหสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของ  $f \text{Re}$  ดังสมการต่อไปนี้

$$f \text{Re} = 96(1 - 1.3553\alpha + 1.9467\alpha^2 - 1.7012\alpha^3 + 0.9564\alpha^4 - 0.2537\alpha^5) \quad (2.5)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ อัตราส่วนด้าน (Aspect Ratio) โดยเป็นอัตราส่วนความยาวด้านกว้างต่อความยาวด้านยาวของหน้าตัดท่อแบบสี่เหลี่ยม

### 2.1.2 การถ่ายเทความร้อน

ค่าความต้านทานความร้อน เป็นการคำนวณความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองที่มีการถ่ายเทความร้อนหลายวิธี ในการศึกษาปัจจุบันมีการถ่ายเทความร้อนสองวิธีร่วมกันคือการพาความร้อนของของไหลในท่อ และการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนที่เป็นของแข็งของแบบจำลอง

ในแบบจำลองการไหลในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กได้มีสมการนำการคำนวณค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นดังนี้

$$R_{th} = \frac{T_b - T_{inlet}}{\dot{Q}A_b} \quad (2.6)$$

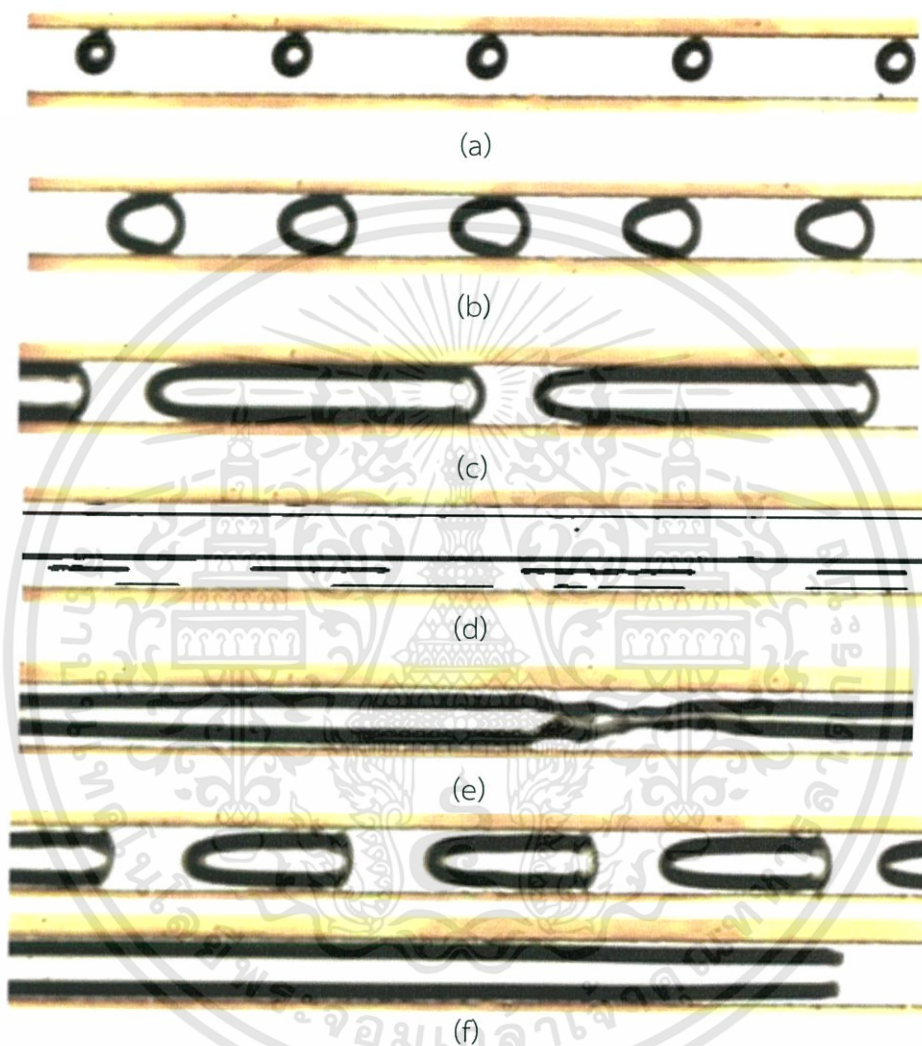
เมื่อ  $T_b$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวที่ถูกให้ความร้อน  $T_{inlet}$  คือ อุณหภูมิของน้ำขาเข้า  $\dot{Q}$  คือ พลักซ์ความร้อนที่ให้แก่แบบจำลอง และ  $A_b$  คือ พื้นที่ที่ถูกให้ความร้อน



## 2.2 ของไหลสองสถานะ

### 2.2.1 รูปแบบการไหล

รูปแบบการไหลต่างๆของการไหล น้ำ – อากาศ สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.1 โดยสามารถแบ่งเป็น 6 รูปแบบการไหล ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการไหล น้ำ – อากาศ (a) Bubble Flow, (b) Slug Bubble Flow, (c) Elongated Bubble Flow, (d) Stratified Flow, (e) Liquid Ring Flow, (f) Multiple Flow จากการศึกษาของ Choi และคณะ (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Bubble Flow รูปแบบการไหลนี้ อากาศจะมีลักษณะเป็นฟองเล็กๆ กระจายอยู่ในน้ำ ส่วนที่เป็นฟองอากาศส่วนใหญ่จะไหลอยู่ด้านบนของท่อ
2. Slug Bubble Flow รูปแบบการไหลนี้ อากาศจะมีลักษณะเป็นก้อนๆไหลอย่างสม่ำเสมอ แต่ละฟองอากาศนั้นจะถูกแยกออกด้วยน้ำ
3. Elongated Bubble Flow รูปแบบการไหลนี้ อากาศจะมีลักษณะคล้าย Slug Bubble Flow แต่มีขนาดของฟองอากาศที่ยาวกว่า ไหลอย่างสม่ำเสมอ แต่ละฟองอากาศนั้นจะถูกแยกออกด้วยน้ำ
4. Stratified Flow รูปแบบการไหลนี้ จะมีการแยกชั้นระหว่างน้ำ - อากาศอย่างชัดเจน โดยที่น้ำไหลอยู่ด้านล่างและอากาศไหลอยู่ด้านบนของท่อ
5. Liquid Ring Flow รูปแบบการไหลนี้ จะมีการรวมตัวของอากาศและไหลอยู่ตรงกลางมีน้ำล้อมรอบและจะมีบางส่วนของอากาศที่เกือบขาดออกจากกัน
6. Multiple Flow รูปแบบการไหลนี้ จะมีการไหลมากกว่าหนึ่งแบบ

### 2.2.2 ความดันลด

การคำนวณหาความดันลดสำหรับการไหลของของไหลสองสถานะนิยมใช้แบบจำลองการไหลแบบเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous Flow Model, HFM) เพราะเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดในการใช้หาความดันลดสำหรับของไหลสองสถานะ โดยแบบจำลองนี้ตั้งอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าเฟสของแก๊สและเฟสของของเหลวมีการผสมเข้าด้วยกันกับการคำนวณหาความดันลดสำหรับของไหลสถานะเดียวแต่จะคำนวณโดยใช้คุณสมบัติที่เกิดจากการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสองสถานะ

ความดันลดที่เกิดขึ้นทั้งหมดสำหรับของไหลสองสถานะจะประกอบไปด้วย ความดันลดที่เกิดจากความเสียดทาน (Frictional Pressure Drop,  $\Delta P_{friction}$ ), ความดันลดที่เกิดจากความเร่ง (Acceleration Pressure Drop,  $\Delta P_{acceleration}$ ), ความดันลดที่เกิดจากการหดตัวอย่างฉับพลัน (Pressure Drop due to Sudden Contraction,  $\Delta P_{contraction}$ ), และความดันลดที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational Pressure Drop,  $\Delta P_{gravitation}$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{friction} + \Delta P_{acceleration} + \Delta P_{contraction} + \Delta P_{gravitation} \quad (2.7)$$

จากการศึกษาของ Saisorn and Wongwises (2008) พบว่าความดันลดที่เกิดจากความเร่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.007 – 5.1% ของความดันลดที่เกิดขึ้นทั้งหมด ในขณะที่ความดันลดที่เกิดจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหัดตัวอย่างฉบับพลันมีค่าอยู่ระหว่าง 0.14 – 2.09% ของความดันลดทั้งหมด ซึ่งเมื่อเทียบกับความดันลดที่เกิดขึ้นทั้งหมดความดันลดทั้งสองนี้มีค่าน้อยมาก จึงสามารถตัดออกจากการคำนวณได้ ส่วนความดันลดที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงนั้นถือว่ามีค่าน้อยมากเพราะความยาวของไมโครแซแนลน้อยจึงแทบจะไม่ส่งต่อความดันลดที่เกิดขึ้นทั้งหมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ความดันลดที่เกิดขึ้นจะมาเท่ากับความดันลดที่เกิดจากความเสียดทานของของไหลสองสถานะ สามารถคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองการไหลแบบเป็นเนื้อเดียว (HFM) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{friction} = f_{TP} \frac{LG^2}{2\rho_{TP}D_h} \quad (2.8)$$

โดยที่  $f_{TP}$  คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานของของไหลสองสถานะ (Two-phase Friction Factor),  $G$  คือ ฟลักซ์มวลของไหล และ  $\rho_{TP}$  คือ ความหนาแน่นของของไหลแบบสองสถานะ (Two-phase Density) ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\rho_{TP} = \left( \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\rho_L$  และ  $\rho_G$  คือ ความหนาแน่นของของเหลวและแก๊ส ตามลำดับ และ  $x$  คือ ค่าคุณภาพเชิงมวล (Mass quality) ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (2.10)$$

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

สำหรับค่าตัวประกอบความเสียดทานของของไหลสองสถานะ ( $f_{TP}$ ) ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ (Two-phase Reynold Number,  $Re_{TP}$ ) ซึ่งถูกนิยามไว้ตามสมการต่อไปนี้

$$Re_{TP} = \frac{GD_h}{\mu_{TP}} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\mu_{TP}$  คือ ความหนืดของของไหลสองสถานะ (Two-phase Viscosity) โดยค่าความหนืดนี้ สามารถคำนวณได้หลายวิธี ได้แก่

แบบจำลองความหนืดของ McAdams และคณะ (1942)

$$\mu_{TP} = \left( \frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

แบบจำลองความหนืดของ Owen (1961)

$$\mu_{TP} = \mu_L \quad (2.13)$$

แบบจำลองความหนืดของ Lin และคณะ (1991)

$$\mu_{TP} = \frac{\mu_G \mu_L}{\mu_G + x^{1.4}(\mu_L - \mu_G)} \quad (2.14)$$

แบบจำลองความหนืดของ Awad และ Myuztchka (2008)

$$\mu_{TP} = \mu_G \frac{2\mu_G + \mu_L - 2(\mu_G - \mu_L)(1-x)}{2\mu_G + \mu_L + (\mu_G - \mu_L)(1-x)} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 วิธีคำนวณเชิงตัวเลข

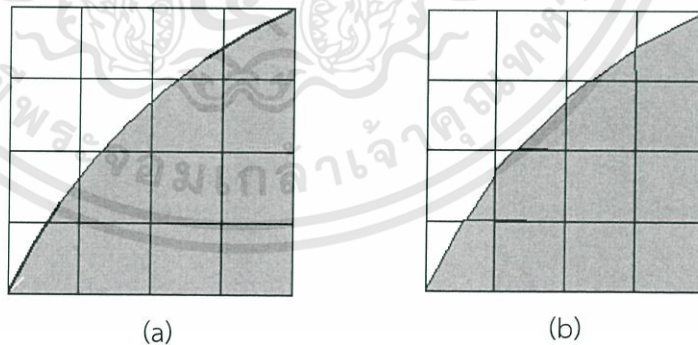
### 2.3.1 การคำนวณเชิงตัวเลขของของไหลสองสถานะด้วยวิธีการแบ่งส่วนปริมาตรของไหล (Volume of Fluid, VOF)

ในการศึกษาปัจจุบัน ได้ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของของไหลสองสถานะด้วยวิธีการ VOF (Volume of Fluid Method) ซึ่งเป็นวิธีการในการแบ่งแยกของไหลแต่ละสถานะบนผิวสัมผัสระหว่างของไหล จากการคำนวณอัตราส่วนปริมาตรของของไหลแต่ละสถานะ

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2.16)$$

โดยที่  $q$  แสดงถึงของไหลสถานะหนึ่ง และ  $\alpha_q$  แสดงถึงปริมาตรของของไหลสถานะนั้น โดย  $\alpha_q = 0$  เมื่อในเอลิเมนต์นั้นไม่มีของไหลชนิดนี้อยู่,  $\alpha_q = 1$  เมื่อในเอลิเมนต์นั้นเต็มไปด้วยของไหลชนิดนี้ และ  $0 < \alpha_q < 1$  เมื่อในเอลิเมนต์นั้นประกอบด้วยของไหลหลายชนิด

โดยการแบ่งพื้นที่ของเอลิเมนต์บริเวณที่ติดกันระหว่างของไหลสองสถานะ (Interface) ของการศึกษาปัจจุบันได้ใช้วิธีการ Geometric Reconstruction Scheme ด้วยสมมุติฐานที่ว่าพื้นที่ที่ติดกันระหว่างของไหลสองสถานะมีการแบ่งกันเส้นตรงในแต่ละเอลิเมนต์ และใช้สมการเส้นตรง (Piecewise Linear) ในการคำนวณพื้นที่ของแต่ละหน้าเอลิเมนต์ (Cell Face)



รูปที่ 2.2 แสดงภาพการแบ่งเอลิเมนต์บริเวณที่ติดกันของของไหลสองสถานะ โดยภาพ (a) แสดงรูปร่างที่จริง (b) แสดงการด้วยวิธีการ Geometric Reconstruction Scheme

### 2.3.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน K - Omega SST

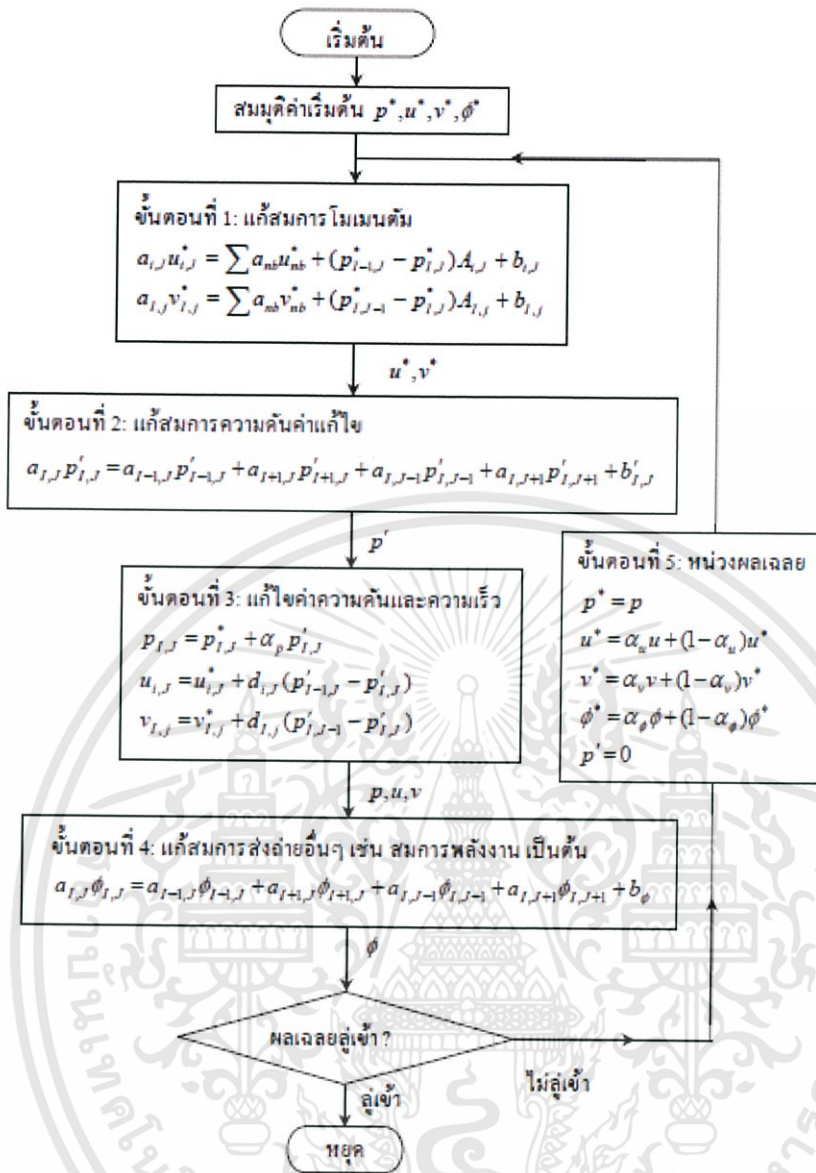
แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน K-Omega SST เป็นสมการที่รวมแนวคิดของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 2 ชนิด ชนิดแรกคือ การไหลแบบปั่นป่วน K-Omega ซึ่งมีความสามารถในการคำนวณการไหลบริเวณใกล้ผนังได้ดี แต่ในขณะเดียวกันบริเวณที่ห่างท่อแบบจำลองการไหลปั่นป่วน K-Omega SST จะใช้การไหลแบบปั่นป่วน K-Epsilon แทนซึ่งทำให้มีความเหมาะสมกว่าสำหรับของไหลที่อยู่นอกเหนือขอบเขตที่ทำให้การไหลเกิดการเปลี่ยนแปลง (Free Stream)

### 2.3.3 ปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็ว

ในการศึกษานี้ใช้ปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็ว 2 ชนิด โดย SIMPLE ถูกใช้ในการคำนวณการศึกษาคุณลักษณะการไหลและความสามารถถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียว-น้ำ และ PISO ใช้ในการคำนวณการศึกษาคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะ

#### 2.3.3.1 SIMPLE

SIMPLE หรือย่อมาจาก Semi – Implicit Method for Pressure-Linked Equation เป็นการแก้ โดยวิธีนี้จะเหมาะสำหรับการไหลแบบคงตัว จากรูปภาพที่ 2.3 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE โดย กิริติ (2010) อธิบายได้ดังนี้ ค่าตัวแปรถูกสมมติให้เป็นค่าเริ่มต้นค่าหนึ่ง และแก้สมการโมเมนตัมเพื่อหาค่าความเร็ว นำค่าความเร็วที่แก้ได้นำไปแก้สมการความดันเรียกค่าความดันที่แก้จากสมการนี้ว่าความดันที่ถูกแก้ไข นำค่าความดันที่ถูกแก้ไขไปหาความเร็วด้วยสมการโมเมนตัมและได้คำตอบเป็นความเร็วจะถูกแก้ไข นำค่าความดันแก้ไขและความเร็วแก้ไข นำไปแก้สมการอื่นๆ เช่นสมการพลังงาน หรือสมการความปั่นป่วน แล้วจึงตรวจสอบการลู่เข้าของสมการ หากไม่ลู่เข้าจะนำค่าความดันและความเร็วที่ได้มานำเป็นค่าตัวแปรสมมติและทำการหาคำตอบด้วยวิธีเดิม

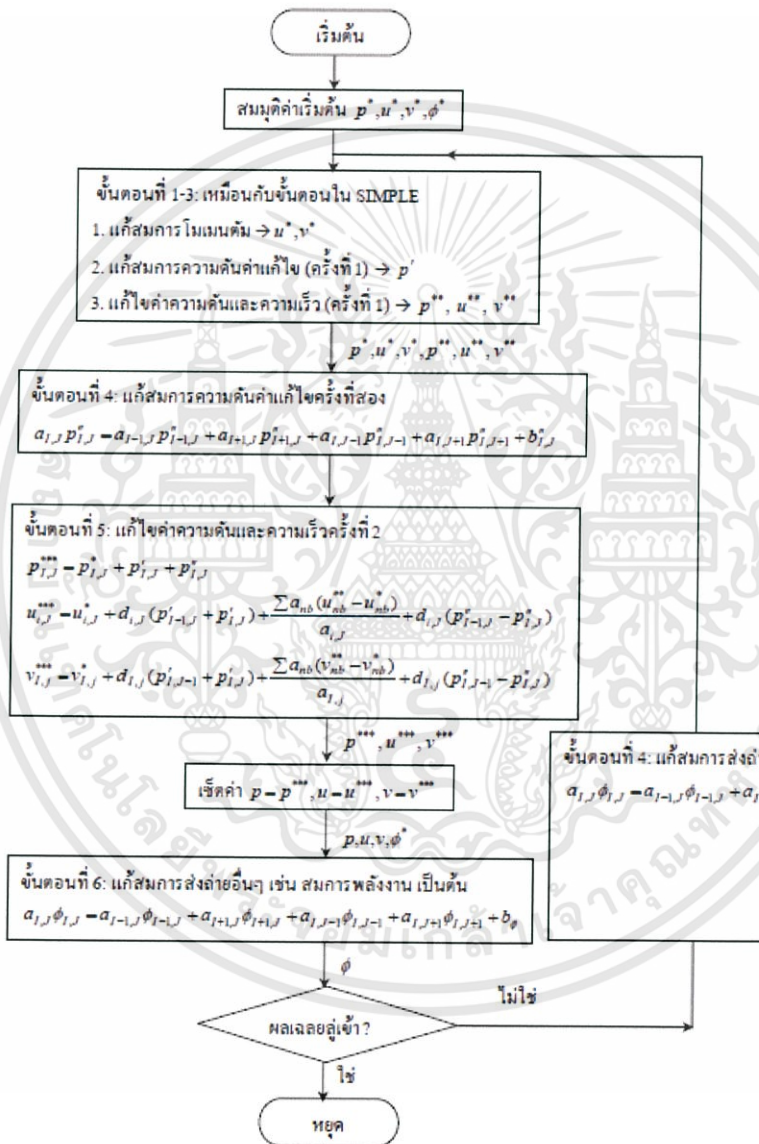


รูปที่ 2.3 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ SIMPLE โดย กীরติ (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3.3.2 PISO

ย่อมาจากคำว่า Pressure Implicit with Splitting Operator เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) ซึ่งถูกใช้ในการศึกษาของไหลสองสถานะ โดยมีลักษณะลำดับคล้ายปฏิสัมพันธ์ความเร็วแบบ SIMPLE แต่มีข้อแตกต่างกันก็คือ ปฏิสัมพันธ์ความเร็วแบบ PISO จะมีการสมการให้ได้ความดันแก้ไขและความเร็วแก้ไขสองครั้ง ก่อนที่จะนำไปหาสมการอื่น



รูปที่ 2.4 แสดงลำดับการทำงานของสมการปฏิสัมพันธ์ความดันความเร็วแบบ PISO โดย กิริติ (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของการไหลของของไหลสถานะเดียวและศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะภายในท่อรูปร่างต่างๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS เป็นโปรแกรมในการศึกษา

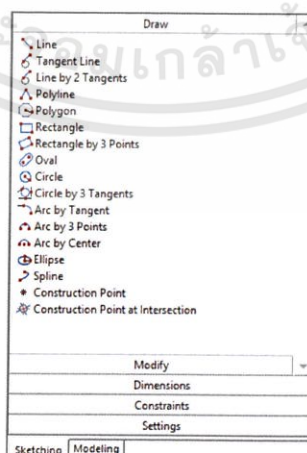
### 3.1 ของไหลสถานะเดียว

การศึกษานี้ถูกกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการศึกษาไว้ดังนี้

1. ของไหลเป็นแบบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady Flow)
2. การไหลเป็นแบบสามมิติ (Three-Dimensional)
3. ของไหลเป็นของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) ที่มีคุณสมบัติคงที่
4. ไม่คิดผลของการสูญเสียจากความหนืดและความเค้นเฉือน

#### 3.1.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)

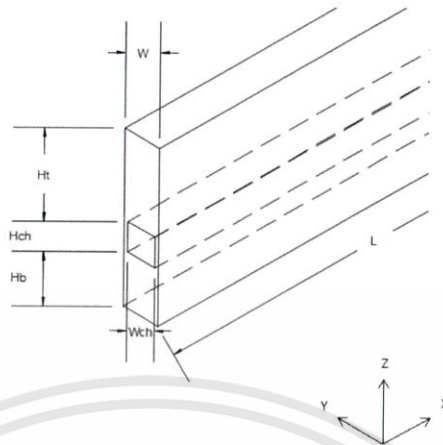
การสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาสามารถเพื่อนำไปใช้หาคำตอบในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ สร้างโดยใช้โปรแกรมอื่น เช่น โปรแกรม AUTO CAD หรือ SOLIDWORK แล้ว Export แบบจำลองและนำมา Import เข้าโปรแกรม ANSYS โดยไฟล์ที่สามารถ import เข้าได้จะต้องมีนามสกุล .IGS, .SAT และสร้างภายในโปรแกรม ANSYS โดยใช้คำสั่ง Sketching



รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้วาดแบบจำลองภายในโปรแกรม ANSYS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.1 ขนาดของแบบจำลองของไหลสถานะเดียว



รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของไหลสถานะเดียวที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาของไหลสถานะเดียว

$H_t$ (mm)	$H_b$ (mm)	$H_{ch}$ (mm)	$H_{total}$ (mm)
12.7	5.637	0.713	19.5
t (mm)	$W_{ch}$ (mm)	$W_{total}$ (mm)	L (mm)
0.118	0.231	0.467	44.764

### 3.1.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)

แบ่งแบบจำลองที่สร้างออกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยเลือกใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมทหกหน้า (Hexahedron) และกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เพื่อหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม (Grid Independence) ในการคำนวณซึ่งจะช่วยลดเวลาในการหาคำตอบ

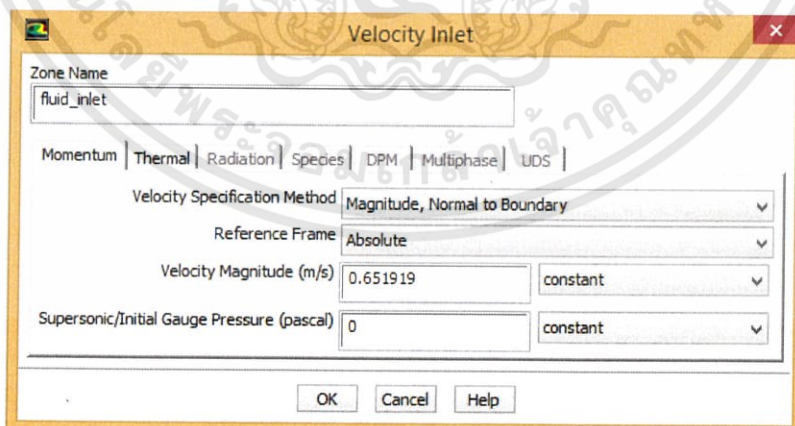
ในการไหลในการศึกษาของไหลสถานะเดียวกำหนดจำนวนของเอลิเมนต์ 3 ด้าน ได้แก่ ด้านกว้าง, ด้านสูง, ด้านยาว จะได้จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 908,352 เอลิเมนต์, 1,160,000 เอลิเมนต์ และ 1,768,608 เอลิเมนต์

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Edges
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
<input type="checkbox"/> Number of Divisions	120
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Bias Type	No Bias
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (0. m)

รูปที่ 3.3 การกำหนดจำนวนของเอลิเมนต์ของแบบจำลอง

### 3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ในการศึกษาตั้งค่าความเร็วทางเข้าของของไหลเป็น Velocity Inlet, ใช้ค่าความเร็วที่คำนวณมาจากสมการเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, กำหนดให้อุณหภูมิทางเข้าของของไหลเท่ากับ 288.15 K, ตั้งค่าผนังด้านล่างของแบบจำลองเป็นผนังแบบมีความร้อน (Heat Flux) มีค่าเท่ากับ  $10^6 \text{ W/m}^2$ , ตั้งค่าความเร็วทางออกของของไหลเป็น Pressure Outlet, เงื่อนไขขอบเขตบริเวณผิวของของแข็งไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Adiabatic), ผนังระหว่างของแข็งและของไหลมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกัน

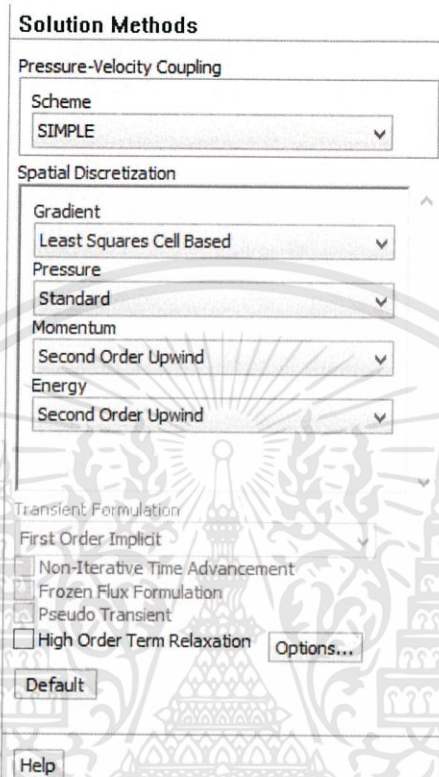


รูปที่ 3.4 กำหนดค่าความเร็วทางเข้าของของไหลที่คำนวณมาจากสมการเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

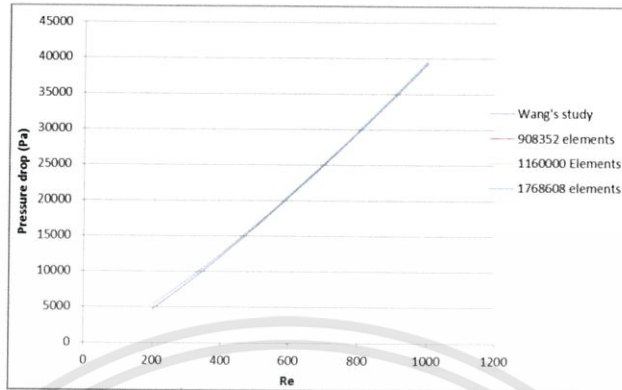
### 3.1.4 การตั้งค่าสำหรับคำนวณคำตอบ

จากแบบจำลองที่มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) ในสภาวะคงตัว (Steady State) เลือกวิธีการคำนวณผลแบบ SIMPLE



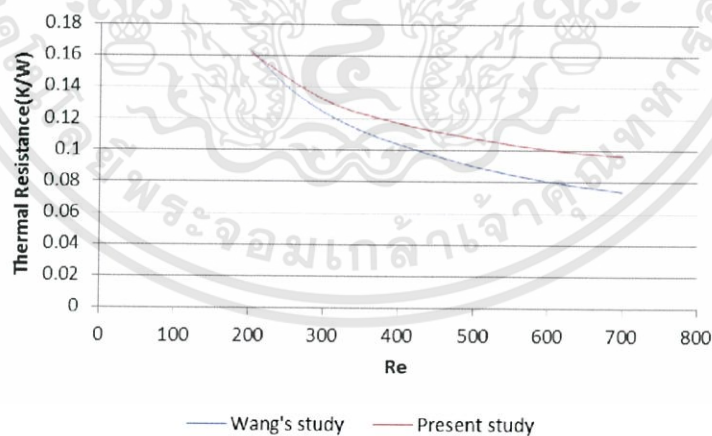
รูปที่ 3.5 การตั้งค่าสำหรับการคำนวณแบบ SIMPLE

### 3.2 ตรวจสอบความถูกต้องของของไหลสถานะเดียวกับแบบจำลองต้นแบบ (Validation)



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความดันตกของของไหลระหว่างผลการศึกษาของ Wang [2] กับ ผลการศึกษาที่ 908,352 เอลิเมนต์, 1,160,000 เอลิเมนต์, 1,768,608 เอลิเมนต์

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบความดันตกของของไหลระหว่างผลการศึกษาของ Wang[2] กับผลการศึกษาที่ 908,352 เอลิเมนต์, 1,160,000 เอลิเมนต์, 1,768,608 เอลิเมนต์ ซึ่งมีเงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบของทุกค่าอยู่ที่  $10^{-6}$  ยกเว้นสมการพลังงานซึ่งอยู่ที่  $10^{-9}$  จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากจึงเลือกใช้ 908,352 เอลิเมนต์ในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างผลการศึกษาของ Wang [2] กับผลการศึกษาปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างผลการศึกษาของ Wang [2] กับผลการศึกษาปัจจุบัน ค่าความแตกต่างเฉลี่ยของค่าความต้านทานทางความร้อนของทั้งสองแบบจำลองตั้งแต่เรย์โนลด์ส์มีเบอร์ 200 – 700 จะเท่ากับ 15.5%

### 3.3 ของไหลสองสถานะ

การศึกษานี้ถูกกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการศึกษาไว้ดังนี้

1. การศึกษาของไหลสองสถานะใช้วิธี VOF
2. ของไหลเป็นแบบคงตัวเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient)
3. การไหลเป็นแบบสามมิติ (Three-Dimensional)
4. ของไหลเป็นของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) ที่มีคุณสมบัติคงที่
5. ของไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้
6. ไม่คำนึงถึงผลของแรงโน้มถ่วง

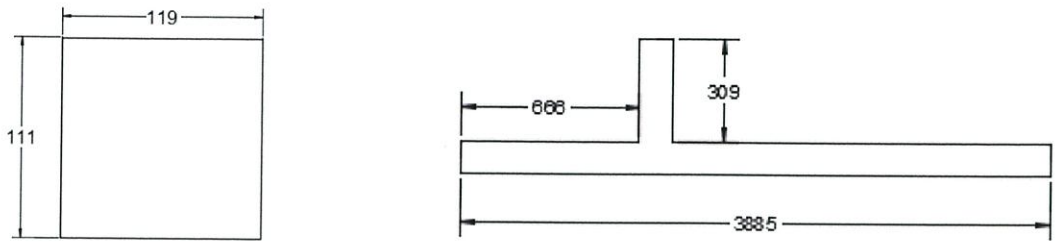
#### 3.3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (Geometry)

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการไหลของของไหลสองสถานะมีทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่

- 3.3.1.1 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศา กับทางเข้าของน้ำ

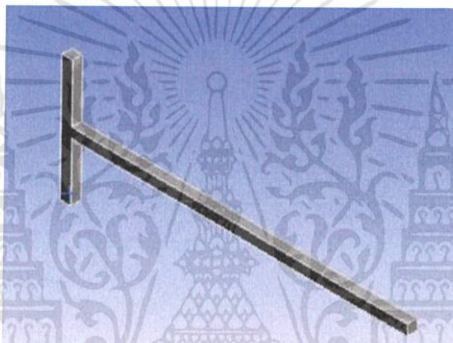


รูปที่ 3.8 แบบจำลอง 3 มิติ แบบที่ 1

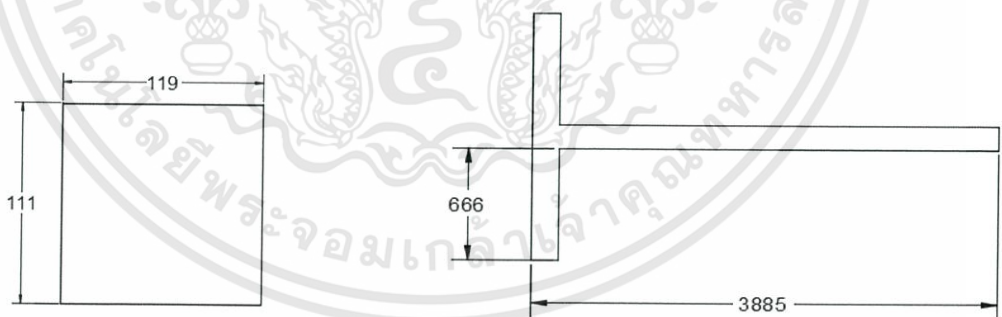


รูปที่ 3.9 แสดงขนาดของแบบจำลองแบบที่ 1 มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร ( $\mu m$ )

### 3.3.1.2 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศ ทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ



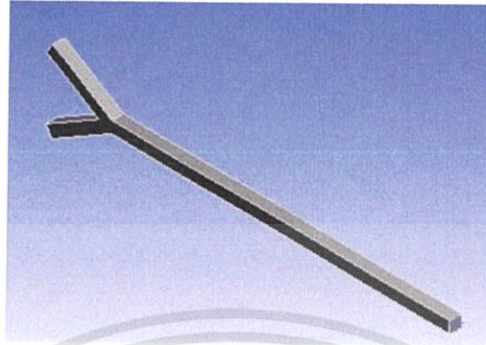
รูปที่ 3.10 แบบจำลอง 3 มิติ แบบที่ 2



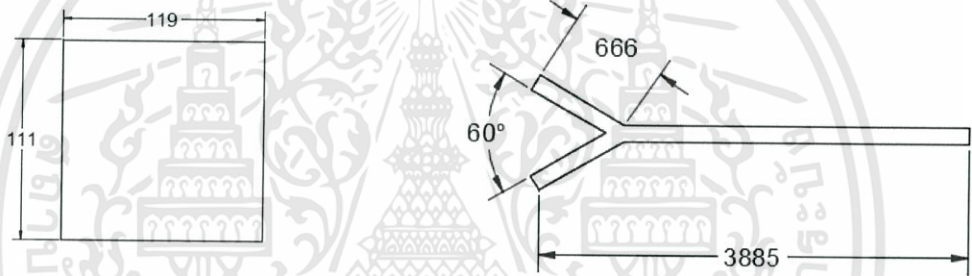
รูปที่ 3.11 แสดงขนาดของแบบจำลองแบบที่ 2 มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร ( $\mu m$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.3 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศ ทำมุม 60 องศา กับทางเข้าของน้ำ



รูปที่ 3.12 แบบจำลอง 3 มิติ แบบที่ 3

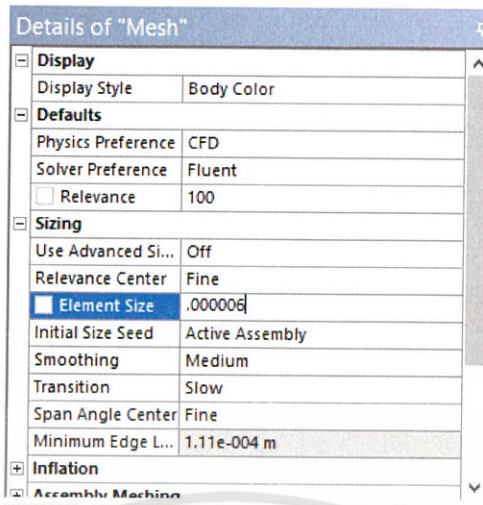


รูปที่ 3.13 แสดงขนาดของแบบจำลองแบบที่ 3 มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร ( $\mu m$ )

### 3.3.2 การแบ่งส่วนชิ้นงาน (Meshing)

แบ่งแบบจำลองที่สร้างออกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยเลือกใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมหกหน้า (Hexahedron) และกำหนดขนาดของเอลิเมนต์เพื่อหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม (Grid Independence) ในการคำนวณซึ่งจะช่วยลดเวลาในการหาคำตอบ

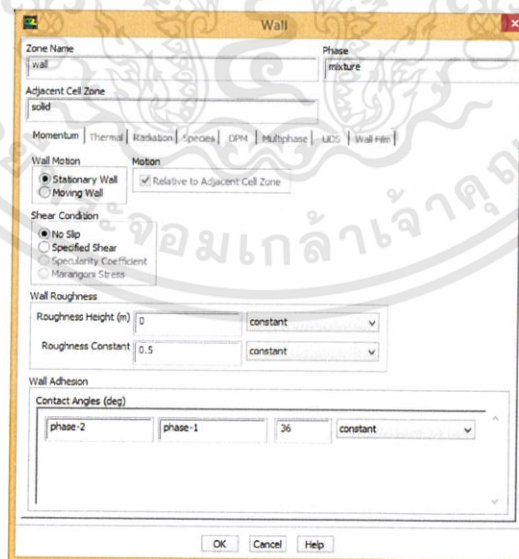
ในการศึกษาของไหลสองสถานะของทั้ง 3 แบบจำลอง ตั้งค่าขนาดของเอลิเมนต์เท่ากับ  $6 \times 10^{-6} m$ . จะได้จำนวนเอลิเมนต์ประมาณ 239,562 เอลิเมนต์



รูปที่ 3.14 การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์

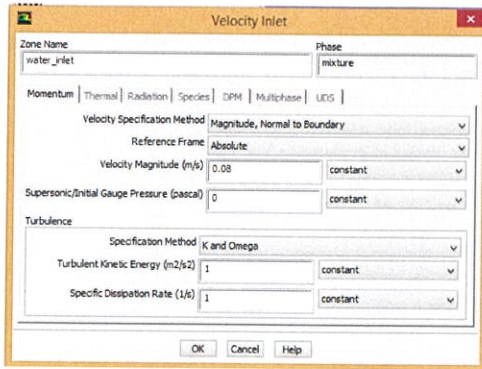
### 3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ในการศึกษาตั้งค่าความเร็วทางเข้าของของไหลเป็น Velocity Inlet, มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของน้ำและอากาศตั้งแต่ 0.08 – 8 m/s, เงื่อนไขขอบเขตบริเวณผิวท่อไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Adiabatic), เงื่อนไขมุมสัมผัสผิระหว่างน้ำ – อากาศ มีค่าเท่ากับ  $36^\circ$  ซึ่งเป็นค่าที่อ้างอิงจากการทดลองของ Santos และ Kawaji [8], สำหรับการไหลของของไหลสองสถานะมีค่าความเค้นระหว่าง น้ำ – อากาศ เท่ากับ 0.0735 N/m และตั้งค่าความเร็วทางออกของของไหลเป็น Pressure Outlet

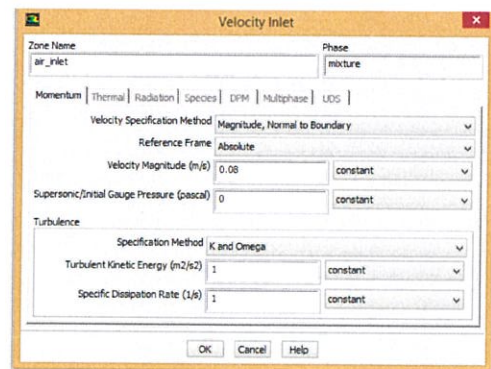


(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

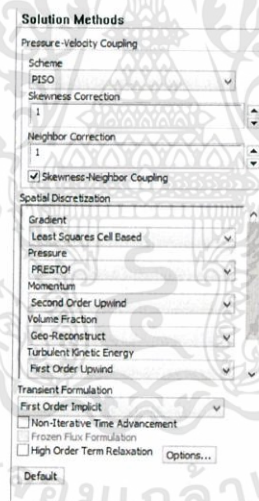


(c)

รูปที่ 3.15 กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง (a) ตั้งค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำ – อากาศ, (b) ตั้งค่าความเร็วของน้ำตั้งแต่ 0.08 – 8 m/s, (c) ตั้งค่าความเร็วของอากาศตั้งแต่ 0.08 – 8 m/s

### 3.3.4 การตั้งค่าสำหรับคำนวณคำตอบ

จากแบบจำลองที่มีการไหลแบบจลนศาสตร์การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ในสถานะขึ้นอยู่กับเวลา (Transient) เลือกวิธีการคำนวณผลแบบ PISO



รูปที่ 3.16 การตั้งค่าสำหรับการคำนวณแบบ PISO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ตรวจสอบความถูกต้องของของไหลสองสถานะกับแบบจำลองต้นแบบ (Validation)

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความยาวฟองอากาศ (Slug Length) ระหว่างการทดลองของ Santos และ Kawaji [8] และแบบจำลองปัจจุบัน

Velocity(m/s)	Slug Length (Santos และ Kawaji)	Slug Length (Study)	(%)Error
$V_G 0.079 V_L 0.21$	284	291.7	2.71
$V_G 0.079 V_L 0.336$	286	270.8	- 5.31
$V_G 0.237 V_L 0.252$	352	354.2	0.62
$V_G 0.396 V_L 0.252$	410	416.7	1.63
		Average Error	2.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด (Pressure Drop) ระหว่างการทดลองของ Santos และ Kawaji [8] และแบบจำลองปัจจุบัน

Velocity(m/s)	Pressure Drop (Santos และ Kawaji)	Pressure Drop (Study)	(%)Error
$V_G 0.079V_L 0.21$	726	723	- 0.41
$V_G 0.079V_L 0.336$	1118	1190.5	6.48
$V_G 0.237V_L 0.252$	1046	1056.2	0.98
$V_G 0.396V_L 0.252$	1131	1138.3	0.65
		Average Error	2.13

จากตารางแสดงการเปรียบเทียบความยาวของฟองอากาศ (Slug Length) และความดันลด (Pressure Drop) ระหว่างการทดลองของ Santos และ Kawaji [8] กับผลการศึกษาปัจจุบัน จะมีค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 2.56% กับ 2.13% ตามลำดับ

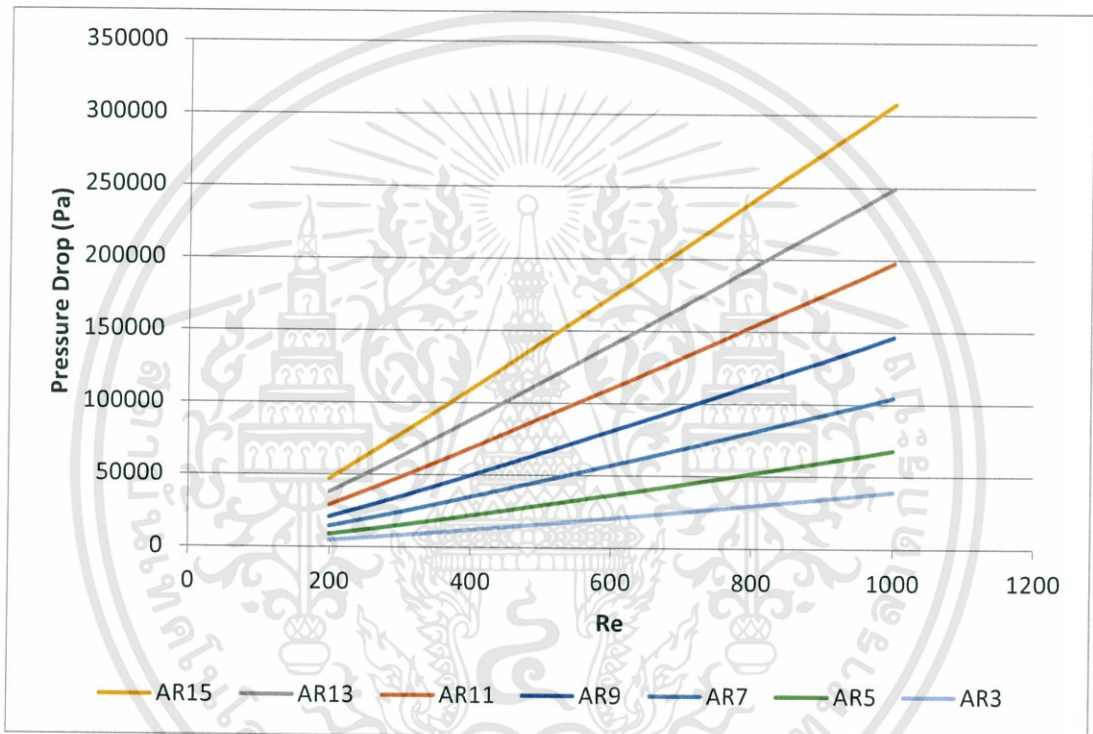
## บทที่ 4

# ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการอภิปราย

### 4.1 การไหลในท่อด้วยของไหลสถานะเดียว

ในการศึกษาของการไหลในท่อด้วยของไหลสถานะเดียว ได้ศึกษาทั้งลักษณะการไหล และความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนด้านของท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก

#### 4.1.1 ลักษณะการไหล



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับตัวเลขเรย์โนลด์ ที่อัตราส่วนด้านตั้งแต่ 3-15

รูปที่ 4.1 แสดงค่าความดันตกที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงให้เห็นว่าในการเพิ่มตัวเลขเรย์โนลด์ค่าความดันตกของทุกอัตราส่วนด้านจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะเป็นเส้นตรง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากค่าการแก้มการ Darcy-Weisbach ซึ่งใช้ค่าความดันลดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้ของการไหลแบบปรับตัวแล้วเต็มที่ (Fully Developed) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนด้านจากการศึกษาของ Shah และ London (1978)

	Re	f	fRe	fRe ที่ได้จากสมการ	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเฉลี่ย
AR=3	200	0.076751	15.35016		
	300	0.051723	15.51697		
	400	0.039281	15.71233		
	500	0.031892	15.9458		
	600	0.026971	16.1829	17.21	-15.02
	700	0.023492	16.4472		
	800	0.020846	16.67713		
	900	0.018823	16.94073		
	1000	0.017193	17.19309		
AR=5	200	0.087628	17.52566		
	300	0.05874	17.6219		
	400	0.044331	17.73242		
	500	0.035778	17.88895		
	600	0.030102	18.06092	19.08	-13.32
	700	0.026079	18.25556		
	800	0.02305	18.43962		
	900	0.02069	18.62094		
	1000	0.018802	18.80214		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

AR=7	200	0.094517	18.90346	20.2	-7.77
	300	0.063026	18.90775		
	400	0.047292	18.91687		
	500	0.038192	19.09608		
	600	0.032012	19.20718		
	700	0.027598	19.31847		
	800	0.024357	19.48586		
	900	0.021834	19.65055		
	1000	0.019759	19.75865		
AR=9	200	0.098422	19.68438	20.91	-6.42
	300	0.065722	19.7167		
	400	0.049479	19.79162		
	500	0.039727	19.86351		
	600	0.033297	19.97833		
	700	0.028729	20.11034		
	800	0.025298	20.2381		
	900	0.022585	20.3269		
	1000	0.020473	20.47267		
AR=11	200	0.102975	20.59501	21.4	-6.72
	300	0.068632	20.58953		
	400	0.051605	20.64182		
	500	0.041502	20.75108		
	600	0.034775	20.86484		
	700	0.029925	20.94761		
	800	0.026365	21.09217		
	900	0.02352	21.16813		
	1000	0.021259	21.25891		

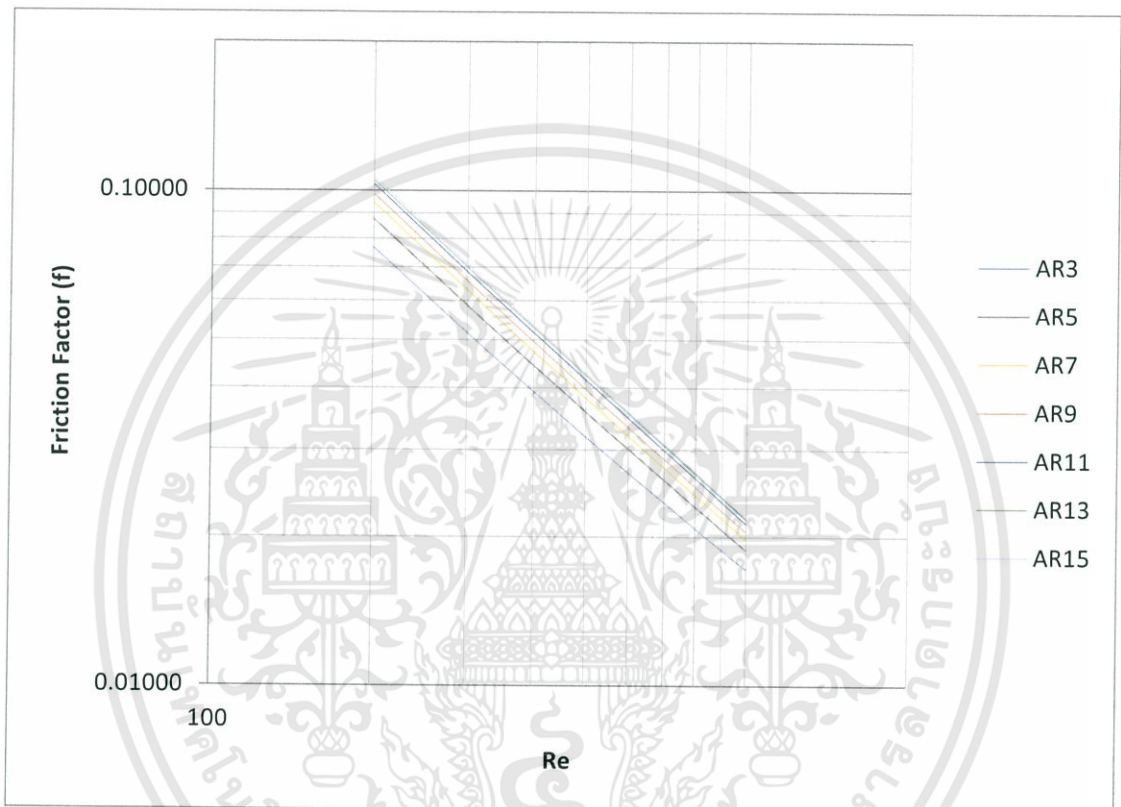
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

AR=13	200	0.105058	21.01161	21.76	-6.19
	300	0.070162	21.04848		
	400	0.052788	21.11502		
	500	0.042405	21.20255		
	600	0.035482	21.28905		
	700	0.030552	21.3866		
	800	0.026856	21.48455		
	900	0.023976	21.57825		
	1000	0.021669	21.66887		
	AR=15	200	0.106618		
300		0.071079	21.32363		
400		0.053396	21.35839		
500		0.042852	21.42618		
600		0.035794	21.47656		
700		0.030797	21.55799		
800		0.027073	21.65837		
900		0.024157	21.74114		
1000		0.021803	21.80342		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อแก้ด้วยสมการ Darcy–Weisbach จะมีค่าเกือบจะคงที่ในอัตราส่วนด้านด้านหนึ่ง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนด้าน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของของ Shah และ London (1978) และเมื่อนำค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทานและอัตราส่วนด้านทั้งสองค่าเปอร์เซ็นต์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



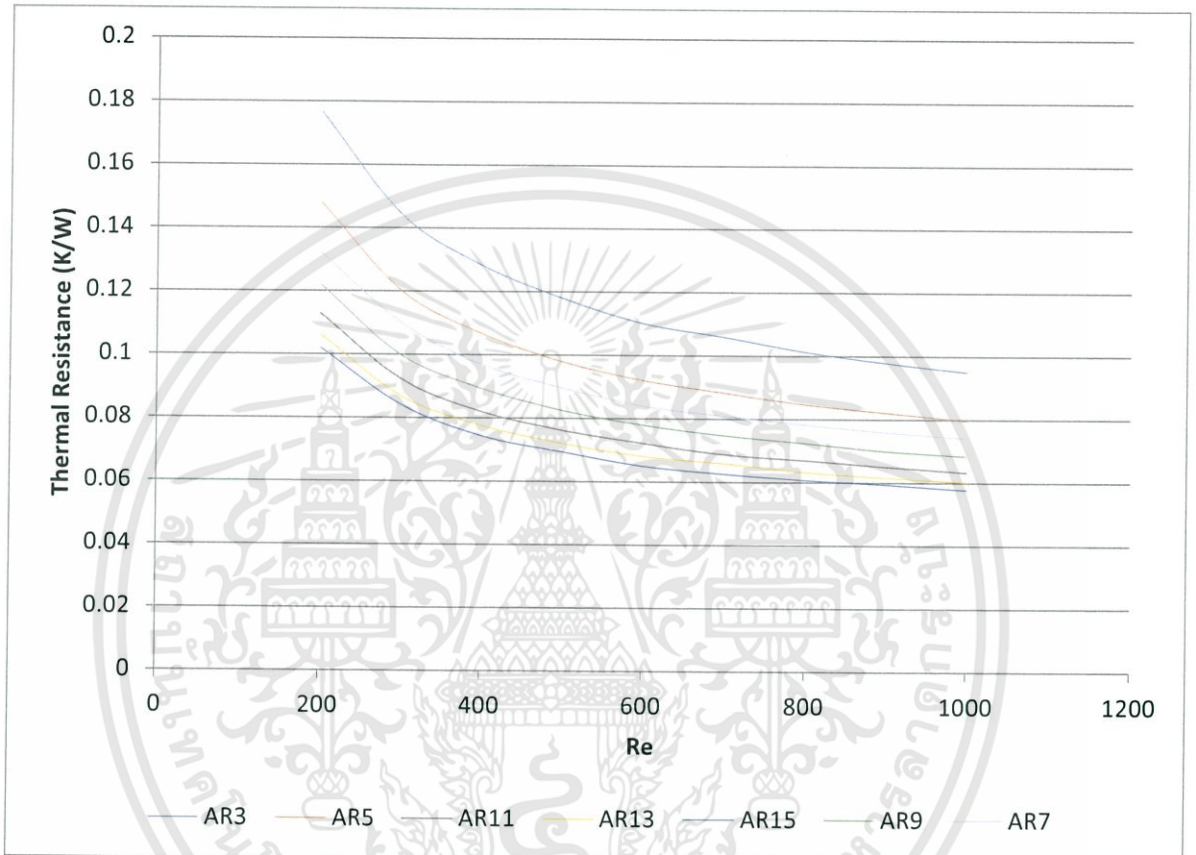
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานการไหลกับตัวเลขเรย์โนลด์ที่อัตราส่วนด้านตั้งแต่ 3-15

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4.1 มาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทานการไหลกับตัวเลขเรย์โนลด์ที่อัตราส่วนด้านตั้งแต่ 3-15 จะพบว่าที่อัตราส่วนด้านด้านหนึ่งค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลงเมื่อเพิ่มตัวเลขเรย์โนลด์โดยมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นตรง แต่หากเพิ่มอัตราส่วนด้านค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกค่าตัวเลขเรย์โนลด์ แต่การเพิ่มอัตราส่วนด้านจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในตอนแรกเท่านั้น แล้วอัตราการเพิ่มของค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลง โดยจากการเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 3 ไปถึง 15 โดยเพิ่มทีละ 2 จะทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานการไหลเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเดิม 12% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 3 ไป 5 , 6% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 5 ไป 7, 4% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 7 ไป 9, 4% จากอัตราส่วนด้านจาก 9 ไป 11, 2% จากอัตราส่วนด้านจาก 11 ไป 13 และ 1% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนจาก 13 ไป 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

ในการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ถูกแสดงด้วยค่าความต้านทานทางความร้อน เนื่องจากแบบจำลองของการศึกษาปัจจุบันมีทั้งส่วนที่เป็นการพาความร้อนด้วยของไหลในท่อขนาดเล็ก และการนำความร้อนบริเวณของทองแดงที่อยู่ล้อมรอบท่อ ด้วยเงื่อนไขของสมมุติฐานที่สนใจแบบจำลองที่มีปริมาตรทั้งหมดของแบบจำลองเท่าเดิม จึงทำให้ค่าทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนที่อัตราส่วนด้านตั้งแต่ 3-15

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าในช่วงที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำค่าความต้านทานความร้อนจะมีค่าสูง และจะลดลงอย่างรวดเร็วแล้วมีแนวโน้มที่ค่าความต้านทานความร้อนจะคงที่ที่เลขเรย์โนลด์มากขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนด้านทำให้ค่าความต้านทานความร้อนลดลง โดยค่าความต้านทานความร้อนเฉลี่ยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้าน โดยจากการเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 3 ไปถึง 15 โดยเพิ่มทีละ 2 จะทำให้ค่าความต้านทานความร้อนเฉลี่ยมีค่าลดลงจากค่าเดิม 19% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 3 ไป 5 , 9% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 5 ไป 7, 8.5% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้านจาก 7 ไป 9, 8.1% จากอัตราส่วนด้านจาก 9 ไป 11, 5.8% จากอัตราส่วนด้านจาก 11 ไป 13 และ 4.2% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนจาก 13 ไป 15

จากการศึกษาการไหลของของไหลสถานะเดียว-น้ำ ในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กพบว่าอัตราส่วน มีผลต่อคุณลักษณะการไหล และความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน ในการเพิ่มอัตราส่วนด้าน จะทำให้ค่าความดันลดและค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่ามากขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนด้านที่เพิ่ม จะทำให้ค่าความดันลดและค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง เมื่อเพิ่ม อัตราส่วนด้านจาก 3 ไป 5 จะทำให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉลี่ยเพิ่มถึง 16% แต่จาก อัตราส่วนด้านจาก 13 ไป 15 อัตราส่วนด้าน ค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉลี่ยเพิ่มจะเพิ่มเพียง 1% เท่านั้น

ในทำนองเดียวกันกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน อัตราส่วนด้านมีผลต่อ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่แสดงในรูปของค่าความต้านทานความร้อนโดยค่าความ ต้านทานความร้อนเฉลี่ยจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนจาก 3 ไป 5 ซึ่งจะลดค่าเฉลี่ยความ ต้านทานความร้อนได้ถึง 19% ในทางกลับกันค่าความต้านทานความร้อนเฉลี่ยจะลดลงน้อยลงเมื่อ เพิ่มอัตราส่วนด้านที่มีค่าสูงจากอัตราส่วนด้าน 13 ไปยังอัตราส่วนด้าน 15 จะมีค่าความต้านทาน ความร้อนลดลงเพียง 4.2 %



## 4.2 การไหลในท่อด้วยของไหลสองสถานะ

ผลของการไหลในท่อด้วยของไหลสองสถานะถูกแบ่งเป็น 2 หัวข้อหลัก ได้แก่ 1.รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง 2.ความดันลดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง

### 4.2.1 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง

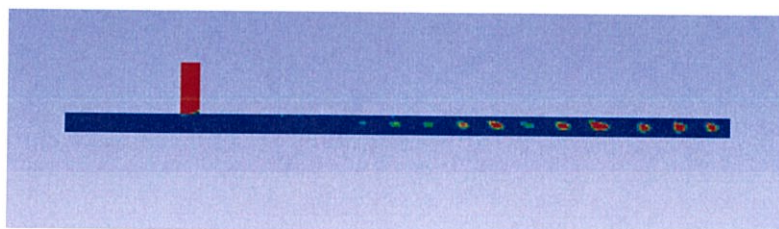
แบบจำลองทั้ง 3 แบบ ให้รูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน ในความเร็วต่างๆ แต่แนวโน้มการเกิดรูปแบบการไหลที่ถูกแบ่งเป็น 5 ชนิด ได้แก่ 1.Bubbly Flow – การไหลแบบฟองเล็กๆ 2.Slug Bubble Flow – การไหลฟองกึ่งวงกลม 3. Elongated Bubble Flow – การไหลแบบฟองขยายตัว 4. Liquid Ring Flow – การไหลที่น้ำล้อมรอบฟองอากาศ 5.Stratified Flow – การไหลแบบแยกชั้น นอกจากนี้การไหลที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้ยังมีการไหลที่เกิดรูปแบบการไหลหลายๆแบบ หรือมีรูปแบบที่ไม่สามารถตัดสินได้อย่างชัดเจน จะถูกเรียกว่า Multiple Flow

เพื่อความชัดเจนในการแบ่งรูปแบบการไหลแบบ Bubbly Flow, Slug Bubble Flow, Elongated Bubble Flow ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ผู้จัดทำจึงใช้มาตรฐานในการแบ่งรูปแบบการไหลจากความยาวของฟองอากาศ (Slug Length,  $L_s$ ) ที่เกิดขึ้นอ้างอิงจากการศึกษาของ โดยอ้างอิงจากการศึกษาของ Choi และคณะ (2010) โดย

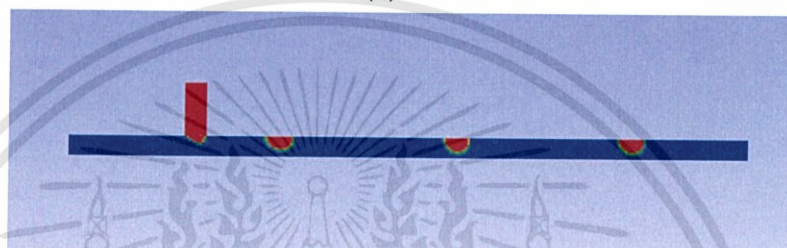
- 1.การไหลแบบ Bubbly Flow จะมีความยาวของฟองอากาศน้อยกว่าความกว้างของท่อ
- 2.การไหลแบบ Slug Bubble Flow จะมีความยาวของฟองอากาศมากกว่าความกว้างของท่อแต่ไม่เกิน 1.5 เท่าของความกว้างท่อ
3. การไหลแบบ Elongated Bubble Flow จะมีความยาวของฟองอากาศมากกว่า 1.5 เท่าของความกว้างท่อ

#### 4.2.1.1 ตัวอย่างรูปแบบการไหลในแต่ละแบบจำลอง

##### 4.2.1.1.1 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศา กับทางเข้าของน้ำ



(a)



(b)



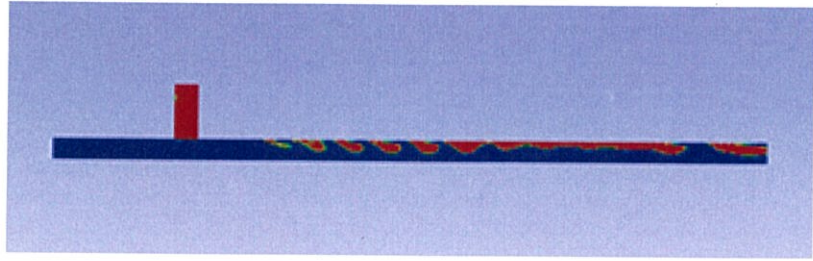
(c)



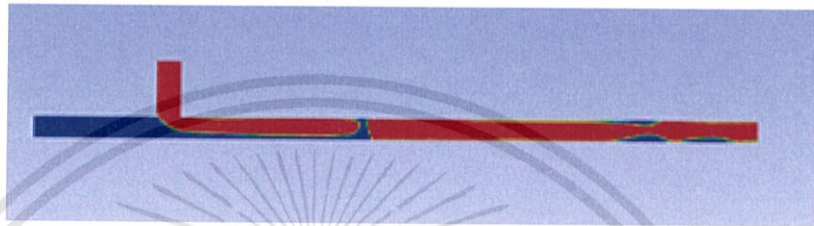
(d)

รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการไหลหลักที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศา กับทางเข้าของน้ำ (a) Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 8 m/s (b) Slug Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.08 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Elongated Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.4 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) Stratified Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.2 m/s

## 4.2.1.1.1 (ต่อ)



(a)



(b)



(c)

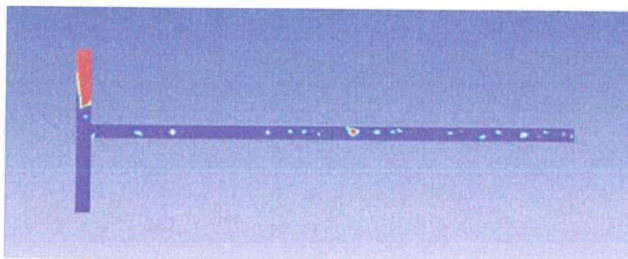


(d)

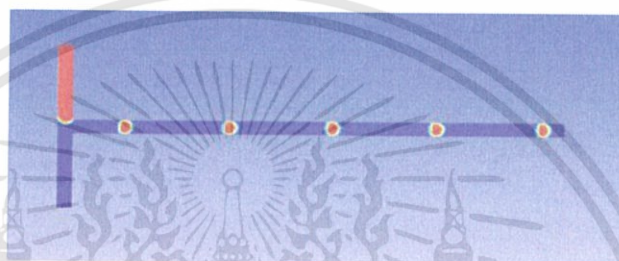
รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการไหลแบบ Multiple Flow ที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศา กับทางเข้าของน้ำ (a) Multiple Bubbly – Stratified Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 8 m/s (b) Multiple Slug – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Multiple Slug - Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (d) Multiple Slug – Stratified Flow Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.08 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

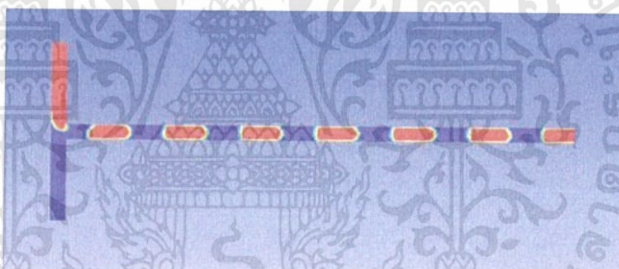
4.2.1.1.2 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของ  
อากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ



(a)



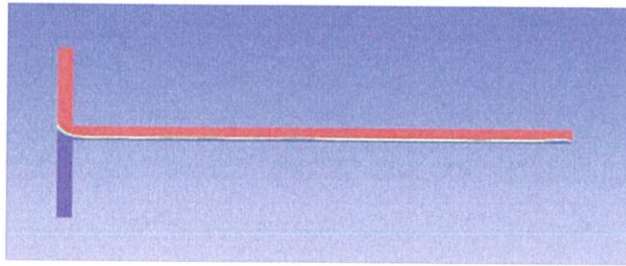
(b)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.1.1.2 (ต่อ)



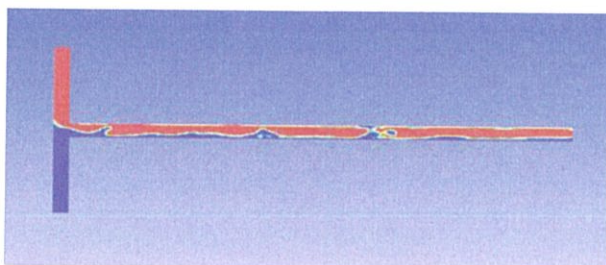
(d)



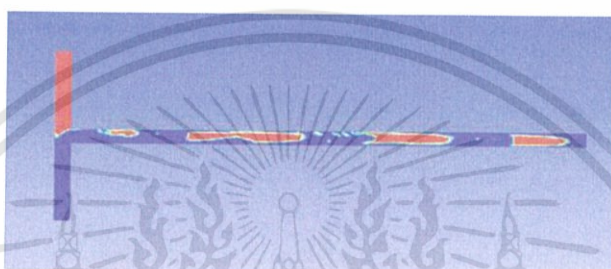
(e)

รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการไหลหลักที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ (a) Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 8 m/s (b) Slug Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.08 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Elongated Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.4 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) Stratified Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.08 m/s (e) Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.2 m/s

## 4.2.1.1.2 (ต่อ)



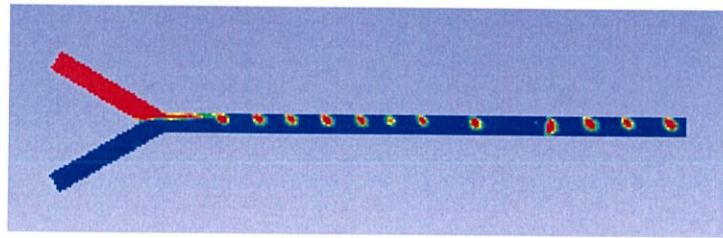
(a)



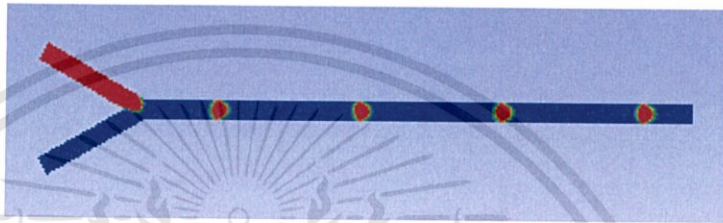
(b)

รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการไหลแบบ Multiple Flow ที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ (a) Multiple Slug – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (b) Multiple Slug - Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 4 m/s

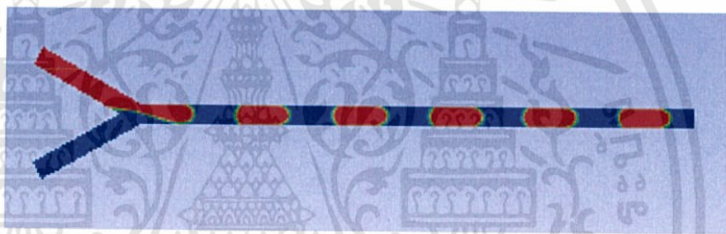
#### 4.2.1.1.3 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศา กับทางเข้าของน้ำ



(a)



(b)



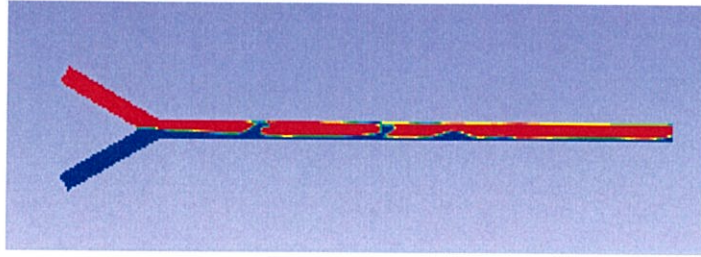
(c)



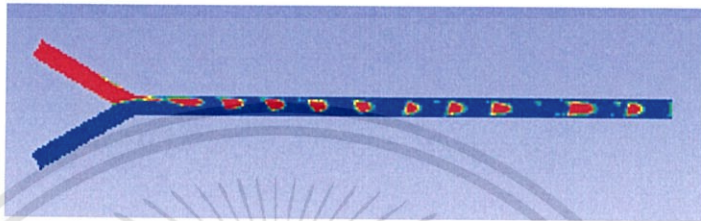
(d)

รูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบการไหลหลักที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศา กับทางเข้าของน้ำ (a) Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.2 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 2 m/s (b) Slug Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.08 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.8 m/s (c) Elongated Bubble Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.4 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็วน้ำเท่ากับ 0.2 m/s

## 4.2.1.1.3 (ต่อ)



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการไหล Multiple Flow ที่เกิดขึ้นในท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศา กับทางเข้าของน้ำ (a) Multiple Slug – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.8 m/s (b) Multiple Slug - Bubbly Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 4 m/s (c) แสดงภาพตัดกึ่งกลางท่อตามแนว ยาวของการไหล Multiple Stratified – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.4 m/s (d) แสดงภาพสามมิติแบบไอโซเมตริกการไหล Multiple Stratified – Liquid Ring Flow ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 m/s ความเร็ว น้ำเท่ากับ 0.4 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

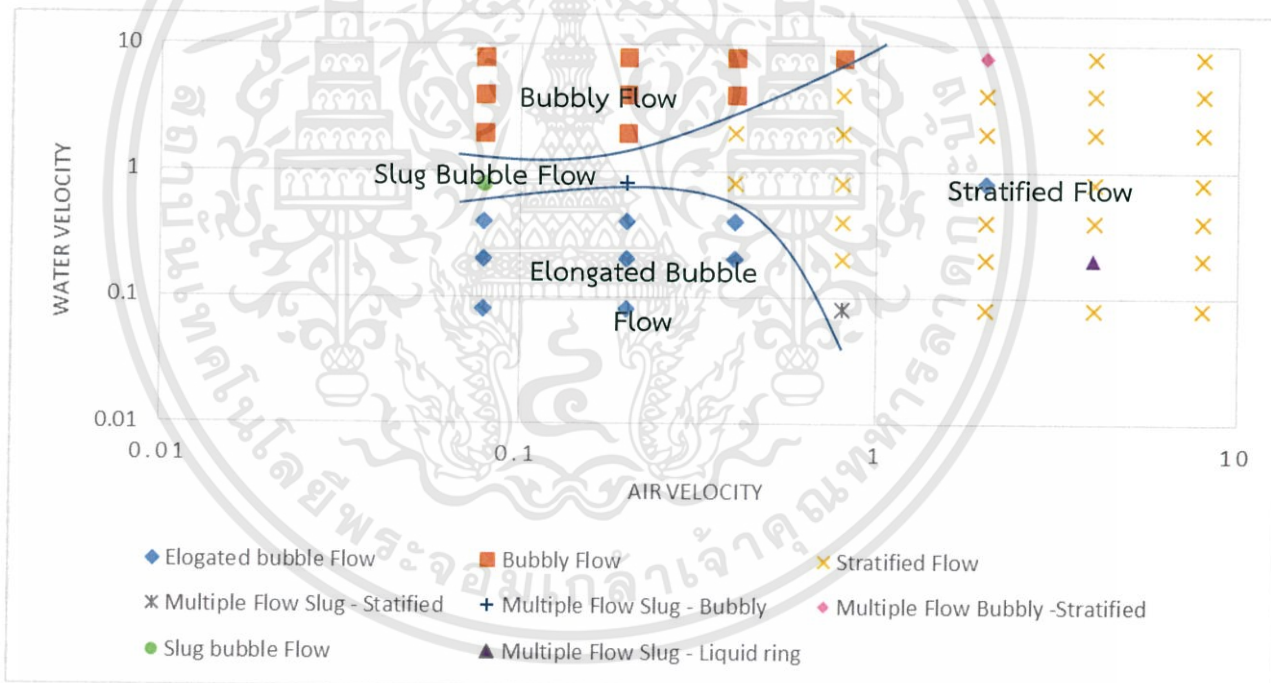
#### 4.2.1.2 แผนภูมิแสดงรูปแบบการไหล

เมื่อนำข้อมูลการไหลในแต่ละแบบจำลองมาสร้างเป็นจุดข้อมูลจะสามารถแสดงได้ดังนี้ ในภาพรวมการเกิดรูปแบบการไหล การไหลแบบ Bubbly Flow ที่ถูกแสดงด้วยจุดสี่เหลี่ยมสีส้ม จะปรากฏขึ้นทั้ง 3 แบบจำลองในเงื่อนไขความเร็วที่คล้ายคลึงกันคือความเร็วของอากาศต่ำและความเร็วของน้ำสูง และหากลดความเร็วของน้ำลงมาให้ต่ำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลจาก Bubbly Flow เป็น Slug Bubble Flow และที่ความเร็วของน้ำต่ำมากๆจะเกิด Elongated Bubble Flow แต่หากเพิ่มความเร็วของอากาศ รูปแบบการไหลจะเปลี่ยนไปซึ่งสามารถเป็นทั้งการไหลแบบ Liquid Ring Flow หรือ Stratified Flow

ทั้งสามภาพด้านล่างแสดงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปแบบการจำลองที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้ โดยรูปแบบการไหลสำคัญ ที่เกิดขึ้นในแต่ละแบบจำลองถูกแบ่งด้วยเส้นสีน้ำเงิน

##### 4.2.1.2.1 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของ

อากาศทำมุม 90 องศากับทางเข้าของน้ำ

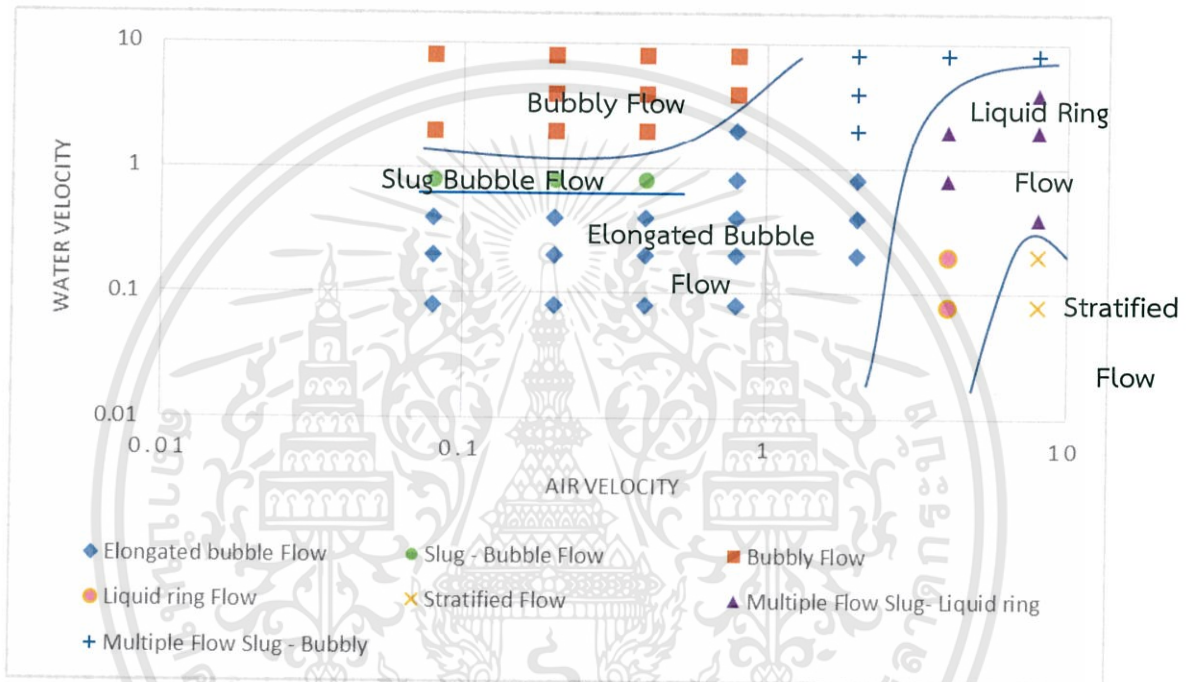


รูปที่ 4.10 แสดงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วน้ำและความเร็วอากาศต่างกันของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศากับทางเข้าของน้ำ

แบบจำลองท่อผสมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศากับทางเข้าของน้ำ มีรูปแบบการไหลที่สำคัญเกิดขึ้นเพียง 4 แบบ ได้แก่ Bubbly Flow, Slug Bubble Flow, Elongated Bubble Flow, Stratified Flow

จุดเด่นของรูปแบบการไหลของแบบจำลองนี้คือ เกิดรูปแบบการไหล Stratified Flow มากกว่าแบบจำลองแบบอื่น ซึ่งเป็นเพราะมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศที่แตกต่างกัน โดยการที่ให้ทางเข้าอากาศอยู่ด้านบน รวมถึงผลของความหนาแน่นซึ่ง ความหนาแน่นของน้ำมีค่าน้อยกว่าอากาศมาก ทำให้ Stratified Flow เกิดได้ง่ายในแบบจำลองนี้

#### 4.2.1.2.2 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ



รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วน้ำและความเร็วอากาศต่างกันของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ

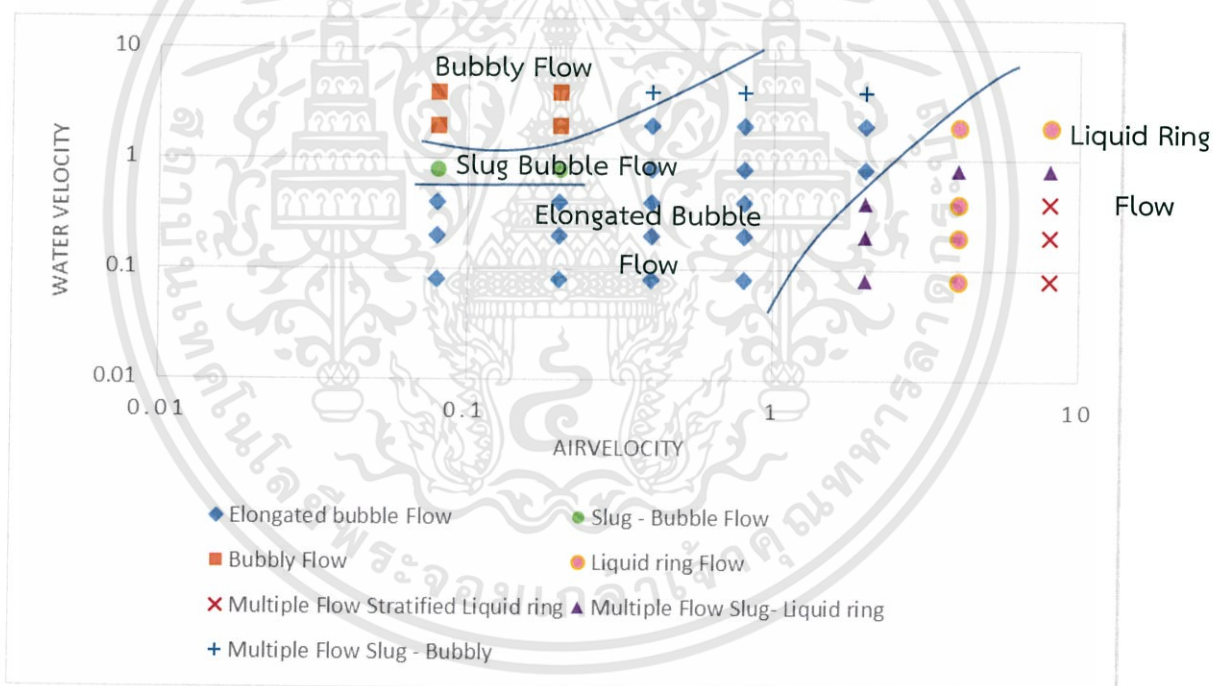
แบบจำลองท่อผสมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ มีรูปแบบการไหลที่สำคัญเกิดขึ้น 5 แบบ ได้แก่ Bubbly Flow, Slug Bubble Flow, Elongated Bubble Flow, Liquid Ring Flow, Stratified Flow

รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ Elongated Bubble Flow รองลงมาเป็น Bubbly Flow ในแบบจำลองนี้จะทำให้เห็นขอบเขตของ Slug Bubble Flow อย่างชัดเจนว่า Slug Bubble Flow จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเพิ่มความเร็วของน้ำจากช่วงที่เกิด Elongated Bubble Flow ก่อนที่จะกลายเป็น Bubbly Flow

จุดเด่นของรูปแบบการไหลของแบบจำลองนี้คือ เกิดรูปแบบการไหล Bubbly Flow มากกว่าแบบจำลองแบบอื่น ซึ่งเป็นเพราะมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศที่ทำให้เกิดการปะทะกันโดยตรงของของไหลทั้งสองชนิด ทำให้ของไหลทั้งสองชนิดมีการแตกตัวเป็นฟองมากกว่าแบบจำลองการไหลรูปแบบอื่น

ในขณะเดียวกันแบบจำลองท่อผสมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา จะทำให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศมีผลให้รูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงไปจาก Elongated Bubble Flow หรือ Bubbly Flow ไปเป็น รูปแบบการไหลแบบ Liquid Ring ก่อนที่จะพัฒนาไปเป็น Stratified Flow แตกต่างกับแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศาที่ทางเข้าของน้ำ ซึ่งศึกษาจากเงื่อนไขความเร็วทางเข้าที่เท่ากันนั้นไม่เกิดรูปแบบการไหลแบบ Liquid Ring เลย

#### 4.2.1.2.3 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาที่ทางเข้าของน้ำ



รูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นที่ความเร็วน้ำและความเร็วอากาศต่างกันของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาที่ทางเข้าของน้ำ

แบบจำลองท่อผสมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาที่ทางเข้าของน้ำ มีรูปแบบการไหลที่สำคัญเกิดขึ้นเพียง 4 แบบ ได้แก่ Bubbly Flow, Slug Bubble Flow, Elongated Bubble Flow, Liquid Ring Flow

แบบจำลองนี้มีการเกิด Bubbly Flow น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองแบบจำลองก่อนหน้านี้ แต่กลับเกิดรูปแบบการไหล Liquid Ring มากกว่าแบบจำลองแบบอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบ แสดงให้เห็นว่ามุมปะทะระหว่างทางเข้าก่อนการผสมของน้ำและอากาศของท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กมีผลต่อรูปแบบการไหล ซึ่งการจากรูปแบบการไหลหลักและรูปแบบการไหล Multiple Flow ที่เกิดขึ้นของแบบจำลองเอง มุมปะทะมีผลทำให้ฟองของอากาศมีขนาดเล็กลง ทำให้โอกาสในการเกิด Bubbly Flow ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศาที่ทางเข้าของน้ำมีมาก รวมถึงยังมีช่วงการเกิด Multiple Flow ที่มีรูปแบบการไหลแบบ Bubbly Flow กว้างกว่าการไหลในแบบจำลองชนิดอื่น

ในขณะที่เดียวกับแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาที่ทางเข้าของน้ำ จะทำให้เห็นรูปแบบการไหลที่เกิดระหว่างแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ทั้ง 2 แบบนั้นคือ Liquid Ring Flow ซึ่งจะเกิดในช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่าง Slug Bubble Flow ไปยัง Stratified Flow

#### 4.2.2 ความดันลดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง

ความดันลดที่เกิดขึ้นในแต่ละแบบจำลองใช้วิธีการเก็บบรรณระนาบที่ถูกผ่ากลางท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กตามแนวยาวโดยจากการเก็บข้อมูลพบว่าในรูปแบบการไหลแตกต่างกันจะมีลักษณะของกราฟความดันที่เก็บได้แตกต่างกัน และสำหรับรูปแบบการไหลที่มีฟองอากาศยกตัวอย่างเช่น Slug Bubble Flow หรือ Elongated Bubble Flow จะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่า บริเวณฟองอากาศจะมีค่าความดันสูงกว่าบริเวณที่เป็นน้ำเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของช่วงที่เป็นฟองอากาศและน้ำจะมีการลดลงที่เท่ากัน ดังนั้นในการศึกษานี้จะแสดงเป็นค่าความดันลดที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยความยาว

4.2.2.1 แสดงค่าความดันลดที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยความยาวในเงื่อนไข  
ความเร็วทางเข้าน้ำและอากาศที่แตกต่างกัน

4.2.2.1.1 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้า  
ของอากาศทำมุม 90 องศาับทางเข้าของน้ำ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในหน่วย kPa/m ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูป  
ตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศาับทางเข้าของน้ำ

Air Velocity (m/s)	Water Velocity (m/s)						
	0.08	0.2	0.4	0.8	2	4	8
0.08	407.9155	691.3736979	1314.987	2083.389	5643.714	11031.64	22937.62
0.2	532.5495	924.3709301	1436.037	2519.87	5398.811	12072.87	23869.22
0.4	-	1025.177475	1682.168	1261.676	3206.167	13414.35	23564.29
0.8	196.797	391.3534649	702.939	1383.047	3550.641	8331.583	29124.48
2	281.4188	503.3846624	857.1729	5368.115	3856.353	8696.468	28692.75
4	412.5955	552.2707729	1051.228	1824.366	4483.266	9333.573	22573.08
8	690.1188	933.5176455	1431.465	2257.142	4890.456	10662.76	26814.99

4.2.2.1.2 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้า  
ของอากาศทำมุม 180 องศาับทางเข้าของน้ำ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในหน่วย kPa/m ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูป  
ตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศาับทางเข้าของน้ำ

Air Velocity (m/s)	Water Velocity (m/s)						
	0.08	0.2	0.4	0.8	2	4	8
0.08	331.7363	736.124	1253.711	2290.872	5045.695	-	24741.23
0.2	439.346	853.0663	1463.368	2616.416	6257.432	10583.59	24741.06
0.4	448	976.7705	1627.492	3990.527	7578.122	12022.09	22872.82
0.8	451.6079	1185.664	2444.609	4752.591	7794.767	13222.99	27894.29
2	-	1443.674	3190.686	5831.163	9834.814	16743.05	34649.46
4	346.1093	465.3026	-	2542.382	9613.078	-	50369.17

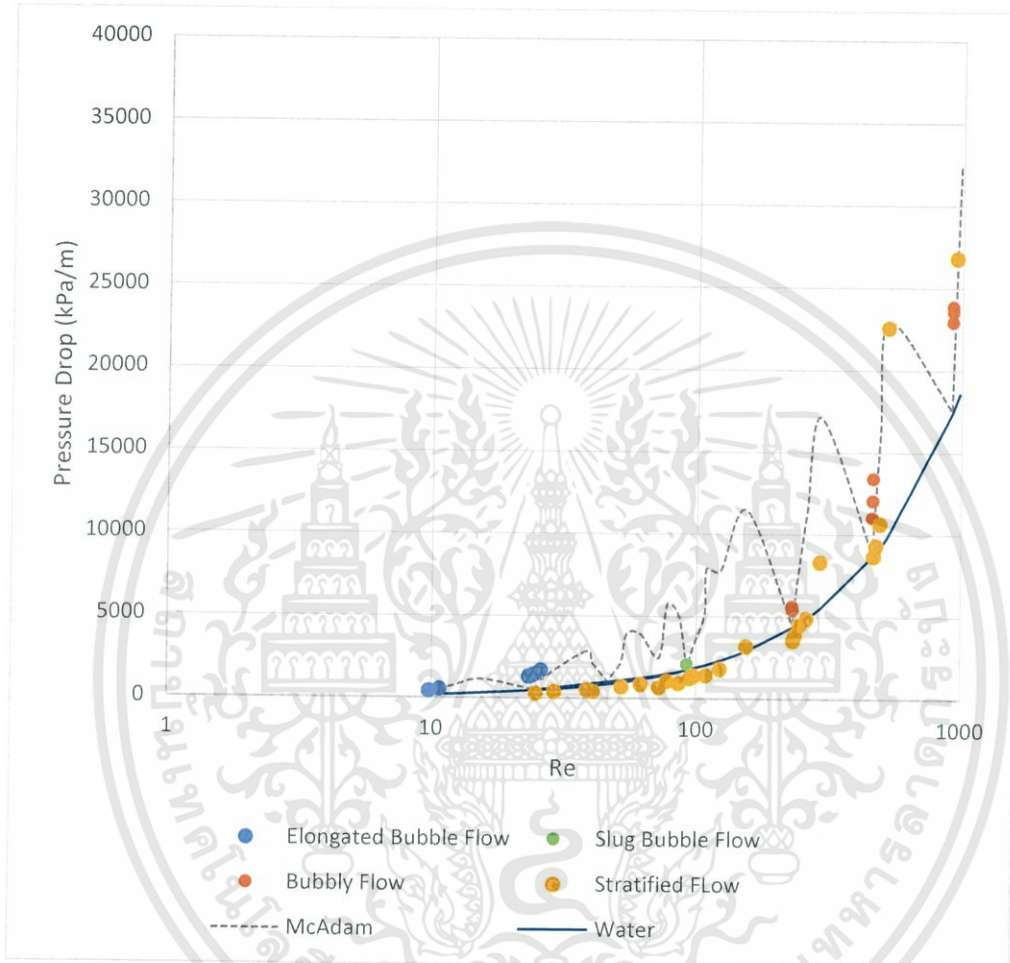
4.2.2.1.3 แบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้า  
ของอากาศทำมุม 60 องศาับทางเข้าของน้ำ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในหน่วย kPa/m ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูป  
ตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาับทางเข้าของน้ำ

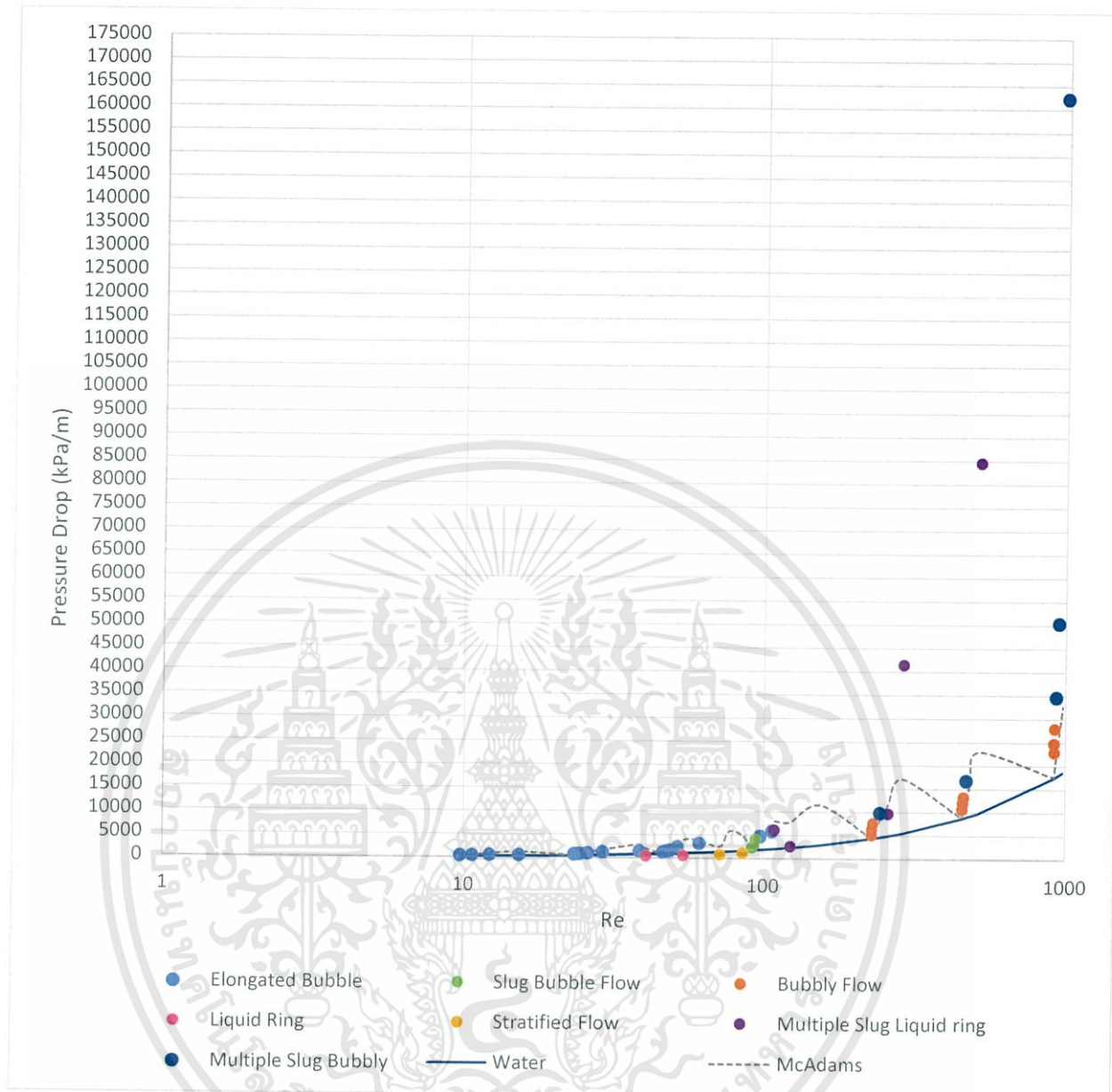
Air Velocity (m/s)	Water Velocity (m/s)						
	0.08	0.2	0.4	0.8	2	4	8
0.08	419.2567	807.5171	1367.4148	2463.4613	5582.8327	-	-
0.2	474.6714	860.7064	1512.5274	3251.5503	6312.9405	10291.3368	-
0.4	505.5919	866.8694	1523.9530	3495.1405	7395.2207	-	-
0.8	649.5489	1173.2405	2527.7463	3990.7401	7788.6969	12796.7676	-
2	-	-	2407.6814	5725.7780	9514.4827	14339.7983	-
4	-	-	1696.5200	4992.5700	10464.5000	-	-
8	897.9291	1688.9657	2620.1124	-	3133.9448	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

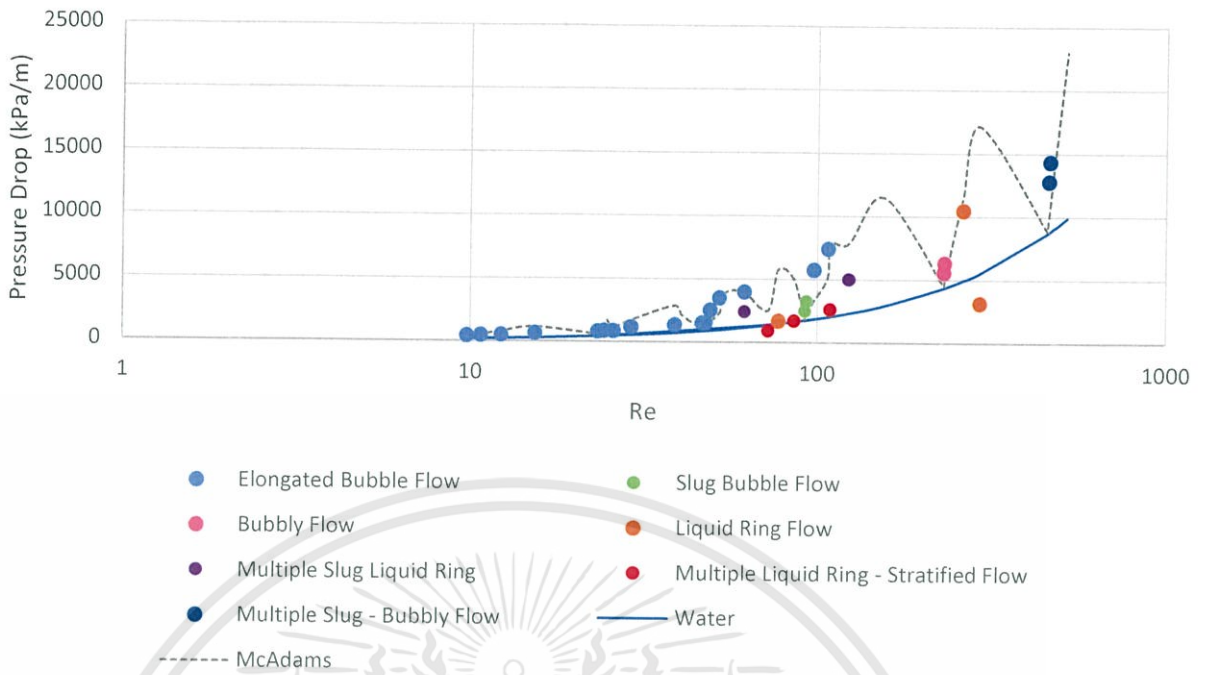
เมื่อนำค่าความดันของไหลสองสถานะที่หาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาเปรียบเทียบกับความดันลดของน้ำที่หาจากสมการ Darcy-Weisbach และค่าความดันของไหลสองสถานะที่สมมุติค่าความหนืดด้วยสมการ McAdams จะสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และตัวเลขเรย์โนลด์ (Re Reynold's Number) ได้ดังนี้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันของของไหลสองสถานะ โดยแบ่งเป็นสี่จุดแสดงถึงรูปแบบการไหลที่แตกต่าง และความดันลดของของไหลสถานะเดียว-น้ำ เทียบที่เลขเรย์โนลด์ต่างกัน ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 90 องศา กับทางเข้าของน้ำ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันของของไหลสองสถานะ โดยแบ่งเป็นสี่จุดแสดงถึงรูปแบบการไหลที่แตกต่าง และความดันลดของของไหลสถานะเดียว-น้ำ เทียบที่เลขเรย์โนลด์ต่างกัน ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศา กับทางเข้าของน้ำ



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความดันของของไหลสองสถานะ โดยแบ่งเป็นสี่จุดแสดงถึงรูปแบบการไหลที่แตกต่าง และความดันลดของของไหลสถานะเดียว-น้ำ เทียบที่เลขเรย์โนลด์ต่างกัน ของแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว Y ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 60 องศาับทางเข้าของน้ำ

จากรูปภาพที่ 5.13, 5.14 และ 5.15 จะแสดงให้เห็นว่า ค่าความดันลดจากสมการ Darcy-Weisbach ของไหลสถานะเดียวจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจากกราฟที่แสดงค่าในแกน  $x$  เป็น Logarithm Scale ค่าของความชันของเส้นกราฟที่ค่า  $x$  มากจะมีค่ามาก ในขณะที่ค่าความดันลดที่ได้จากสมการของไหลสองสถานะที่คำนวณค่าความหนืดด้วยสมการ McAdams จะมีค่ากว้างแต่ยังมีแนวโน้มของเส้นกราฟเหมือนกับค่าความดันลดที่ได้จากสมการ Darcy-Weisbach โดยที่สำหรับรูปแบบการไหลแบบ Stratified Flow ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองจะมีค่าความดันลดใกล้เคียงกับความดันลดของน้ำ แต่สำหรับรูปแบบการไหลแบบ Elongated Bubble Flow, Slug Bubble และ Bubbly Flow จะมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับสมการของไหลของไหลสองสถานะมากกว่า ส่วนรูปแบบการไหลแบบ Multiple Flow โดยเฉพาะ Multiple Slug - Liquid Ring Flow ที่เกิดในแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีการผสมให้ทางเข้าของอากาศทำมุม 180 องศาับทางเข้าของน้ำ มีค่าความดันลดสูงมาก โดยไม่เข้ากับสมการความดันลดทั้งสองแบบ

## สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองเป็นสองส่วนคือ การศึกษาคุณลักษณะการไหลและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ และคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะน้ำ-อากาศ

#### 5.1.1 การศึกษาคุณลักษณะการไหลและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ

ในขอบเขตของการศึกษาเมื่อสนใจผลกระทบจากตัวแปร 2 ชนิดได้แก่ ตัวเลขเรย์โนลด์ และอัตราส่วนด้าน ทั้งสองตัวแปรนี้มีผลกระทบทั้งคุณลักษณะการไหลและความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับการเพิ่มตัวเลขเรย์โนลด์ทำให้ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อสูงขึ้นเป็นเส้นตรง ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้ความต้านทานทางความร้อนต่ำลงโดยมีแนวโน้มแบบสมการยกกำลัง

หากเพิ่มอัตราส่วนด้าน จะทำให้ค่าของความดันลดที่เกิดขึ้น เพิ่มขึ้นตลอดทุกตัวเลขเรย์โนลด์ หรือเพิ่มขึ้นตลอดทั้งเส้นแนวโน้ม แต่อัตราการเพิ่มจะค่อยๆลดลงเมื่ออัตราส่วนด้านมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ในทางตรงกันข้าม ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่แสดงด้วยค่าความต้านทานทางความร้อนจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนด้าน ค่าความต้านทานความร้อนจะลดลงตลอดทั้งเส้นแนวโน้ม โดยที่อัตราการลดลงของความต้านทานความร้อนจะน้อยลงจนแทบไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราส่วนด้านสูงมากๆ

#### 5.1.2 คุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะน้ำ-อากาศ

ผลของรูปร่างทางเข้าทำให้ลักษณะการเกิดรูปแบบการไหลแตกต่างกัน โดยมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศที่ทำให้เกิดการปะทะโดยตรงมากกว่าจะทำให้เกิดการเป็นฟองซึ่งแสดงด้วยรูปแบบการไหลแบบ Bubbly Flow และ Slug Bubble Flow ได้ง่ายกว่ามุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศที่น้อย

รูปแบบการไหลมีผลต่อแนวโน้มของค่าความดันลดที่เกิดขึ้น โดย รูปแบบการไหลแบบการไหลแบบ Stratified Flow จะมีค่าความดันใกล้เคียงกับค่าความดันของน้ำ เมื่อคำนวณค่าความดันของน้ำจากสมการ Darcy-Weisbach และค่าความดันของ Stratified Flow ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศมีค่าเท่ากับ 90 องศา จะมีค่าน้อยกว่าความดันลดที่เกิดขึ้นในการไหลแบบอื่น

สมการของไหลสองสถานะที่ใช้สมการความหนืดของ McAdams ในการหาค่าความดันลดเหมาะสมกับการศึกษานี้มากที่สุด โดยของไหลที่มีรูปแบบการไหลทั้ง Elongated Bubble Flow, Slug Bubble Flow, Bubbly Flow และ Liquid Ring มีความสอดคล้องกับสมการนี้ โดยค่าความ

ต้นตอที่เกิดขึ้นในของไหลดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าความดันสถิตของของไหลสถานะเดียวหรือของไหลสองสถานะในรูปแบบการไหลแบบ Stratified Flow

ยกเว้นการไหลแบบ Multiple Slug-Bubbly Flow ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองท่อผสมสี่เหลี่ยมรูปตัว T ที่มีมุมระหว่างทางเข้าของน้ำและอากาศมีค่าเท่ากับ 180 องศา มีค่าความดันสถิตที่เกิดขึ้นสูงมาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาคุณลักษณะการไหลของของไหลสองสถานะควรเพิ่มความยาวของท่อหลังการผสมของน้ำและอากาศ เนื่องจากบางความเร็วที่ใช้ในการศึกษาอาจทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่มีความคล้ายคลึงกันเช่น Liquid Ring Flow หรือ Multiple Slug-Liquid Ring Flow ซึ่งความยาวของท่อที่สั้นเกินไปอาจจะทำให้ไม่เห็นช่วงที่ขาดกันของ Multiple Slug-Liquid Ring Flow



## บรรณานุกรม

- [1] Chiwoong Choi, Moohwan Kim, 2011, "Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular microchannels", **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 32, pp. 1199-1207
- [2] H. Wang, Z. Chen, J. Gao, 2016, "Influence of geometric parameters on flow and heat transfer performance of micro-channel heat sinks", **Applied Thermal Engineering**, vol. 107, pp. 870-879.
- [3] Md. Emrana, M.A. Islam, 2014, "Numerical investigation of flow dynamics and heat transfer characteristics in a microchannel heat sink", **Procedia Engineering**, vol. 90, pp. 563 – 568.
- [4] P. Suwankamnerd, S. Wongwises, 2015, "An experimental study of two-phase air-water flow and heat transfer characteristics of segmented flow in a microchannel", **Experimental Thermal of Fluid Science**, vol. 62, pp. 29-39.
- [5] R. Santos, M. Kawaji, 2010, "Numerical modeling and experimental investigation of gas-liquid slug formation in a microchannel T-junction", **International Journal of Multiphase flow**, vol. 36, pp. 314-323.
- [6] R. Santos, M. Kawaji, 2011, "Gas-Liquid Slug Formation at a Rectangular Microchannel T-Junction: A CFD Benchmark Case", **Central European Journal of Engineering**.
- [7] W. Qu, I. Mudawar, 2002, "Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single- phase micro-channel heat sinks", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 45, pp. 2549 – 2565.
- [8] X.L. Xie, Z.J. Liu, Y.L. He, T. Tao, 2008, "Numerical study of laminar heat transfer and pressure drop characteristics in a water-cooled minichannel heat sink", **Applied Thermal Engineering**, vol. 29, pp. 64-74.