

การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะในไมโครแชนแนล  
รูปคลื่นที่จัดวางในรูปแบบต่างกัน

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE  
FLOW IN WAVY MICROCHANNELS WITH DIFFERENT ORIENTATIONS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะในไมโครแชนแนล  
รูปคลื่นที่จัดวางในรูปแบบต่างกัน

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE  
FLOW IN WAVY MICROCHANNELS WITH DIFFERENT ORIENTATIONS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE  
FLOW IN WAVY MICROCHANNELS WITH DIFFERENT ORIENTATIONS



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

การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะในไมโครแชนแนลรูปคลื่น  
ที่จัดวางในรูปแบบต่างกัน

นายพรหมพิริยะ	พรหมเสนา	59010917
นายศุภกร	ศรีน้อยเมือง	59011313
นายสายกลาง	ถนอมศรีอุทัย	59011389
ผศ.ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2562		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับลักษณะการถ่ายเทความร้อน ความดันลด และรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเดือด ซึ่งจะเปรียบเทียบกันในลักษณะของทิศทางการไหลในแนวนอน ในทิศไหลขึ้นและไหลลง ซึ่งของไหลจะถูกผสมกันระหว่างน้ำดีไอกับอากาศ ไหลเข้าสู่ช่องไมโครแชนแนลทองแดงซึ่งช่องทางการไหลมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมทั้งหมด 26 ช่องโดยมีลักษณะเป็นคลื่น ช่องทางการไหลมีขนาดกว้าง 0.8 มิลลิเมตร ความสูง 0.5 มิลลิเมตร ความยาวตามทิศทางการไหล 40 มิลลิเมตร แอมพลิจูด 0.5 มิลลิเมตร จากผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนถูกนำมาเปรียบเทียบในแนวทางการไหลในแต่ละแนว พบว่าตัวเลขนัสเซิลท์แปรผันตรงกับเลขเรย์โนลด์และผลลัพธ์ทิศทางการไหลแบบไหลขึ้นให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุด แต่ในผลการทดลองความดันลดในทิศทางการไหลขึ้นจะให้ค่ามากที่สุดเช่นกัน จากการสังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีด้วยกัน 5 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการไหล bubbly flow, รูปแบบการไหล slug flow, รูปแบบการไหลแบบ throat-annular flow, รูปแบบการไหล annular flow และ churn flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN EXPERIMENT STUDY OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF TWO-PHASE FLOW  
IN WAVY MICROCHANNELS WITH DIFFERENT ORIENTATIONS

PROMPIRIYA PROMSENA 59010917

SUPHAKORN SRINOIMEUNG 59011313

SAIKLANG THANOMSRIUTHAI 59011389

Asst. Prof. Dr. Maturose Suchatawat Advisor

Year 2019

**ABSTRACT**

An experiment study of non-boiling two-phase flow in wavy micro-channels is conducted in this work. The heat transfer and pressure drop characteristics and flow patterns are studied to compare to each orientation. The DI water and air are mixed in a mixing chamber and then flow into the wavy micro-channels which consist of 26 parallel rectangular channels. Each channel is the cross-sectional dimensions of 0.8 mm in width, 0.5 mm in depth and 40 mm in length. The amplitude is 0.5 mm. The experiment results Nusselt number is proportional to Reynolds number. In comparison to the other flow directions, vertical upward flow effected the highest heat transfer results and induced the highest pressure drop as well. Two-phase flow observation got 5 different flow patterns including bubbly flow, slug flow, throat-annular flow, annular flow, and churn flow.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาที่เคารพ ผศ.ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าแก่คณะผู้จัดทำ เพื่อให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เสมอมาด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้จากใจจริง

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมสถานที่ในการทำโครงการนี้ และขอบคุณพี่ ศุภกิตต์ รื่นรัมย์และคณะที่ให้ความช่วยเหลือวิธีดำเนินการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ จากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่มาช่วยดำเนินการขั้นตอนที่ทางคณะผู้จัดทำขาดความรู้เรื่องอุปกรณ์การถ่ายทำบางส่วน

สุดท้ายนี้ต้องอุทิศความดีและขอขอบคุณบุคคลสำคัญที่สุด ก็คือ บิดา มารดา และครอบครัวของคณะผู้จัดทำที่เป็นกำลังใจ คอยสนับสนุนในทุกด้าน พร้อมทั้งโอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และกำลังใจจากมิตรแท้ทุกท่าน

นายพรหมพิริยะ พรหมเสนา

นายศุภกร ศรีน้อยเมือง

นายสายกลาง ถนอมศรีอุทัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.4.1 ลักษณะการไหลในท่อขนาดเล็ก.....	3
1.4.2 ลักษณะการไหลในท่อโค้งขนาดเล็ก.....	4
1.4.3 การถ่ายเทความร้อนในแนวนอนและรูปแบบการไหลของของไหล	
2 สถานะ.....	5
1.4.3.1 การไหลในท่อตรง.....	5
1.4.3.2 การไหลในท่อกว้าง.....	6
1.4.4 การถ่ายเทความร้อนในท่อแนวตั้งและรูปแบบการไหลของของไหล	
2 สถานะ.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 รูปแบบการไหลของของไหลแบบสองสถานะในช่องทางการไหลขนาดเล็ก.....	11
2.2 การไหลของของไหลสองสถานะ.....	14
2.2.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลแบบสองสถานะ.....	14
2.2.2 รูปแบบการไหลแบบเป็นเนื้อเดียวกัน.....	15
2.3 การถ่ายเทความร้อน.....	16
2.3.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์.....	16
2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	16
2.3.3 ค่าฟลักซ์ความร้อน.....	17
2.3.4 ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีป.....	17
2.3.4.1 ค่าตัวเลขดีน.....	19
2.3.4.2 ค่าตัวเลขพรีนด์เทิลของการไหลแบบสองสถานะ.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4.3 ค่าตัวเลขสเกลที่เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อคลื่น..	20
2.4 ความดันลดในช่องทางการไหลแบบสองสถานะ.....	20
2.4.1 ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทาน.....	20
2.4.2 ความดันลดเนื่องจากความเร่ง.....	21
2.4.3 ความดันลดเนื่องจากการลดและขยายขนาดช่องทางพื้นที่การไหล.....	21
2.4.4 ความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	22
2.5 ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน.....	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	23
3.1 วงจรการทำงานและรายละเอียดของชุดทดลอง.....	23
3.1.1 คุณสมบัติของท่อคลื่นไมโครโซแนล.....	23
3.1.2 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง.....	24
3.1.3 รายละเอียดของชุดทดลอง.....	25
3.2 ขั้นตอนการศึกษาส่วนประกอบชุดทดลองและซ่อมบำรุง.....	27
3.2.1 การซ่อมบำรุง.....	27
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.4 ค่าที่ใช้ในการทดลอง.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	37
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง.....	37
4.1.1 ตรวจสอบความถูกต้องการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีการวางตัว ในแนวนอน.....	37
4.1.2 ตรวจสอบความถูกต้องการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีการวางตัว ในแนวตั้ง.....	39
4.2 การถ่ายเทความร้อน.....	42
4.2.1 การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ.....	42
4.3 ความดันลด.....	45
4.3.1 สัมประสิทธิ์การเสียดทานการไหลแบบสองสถานะแนวทางการไหล แบบแนวนอน.....	45
4.3.2 สัมประสิทธิ์การเสียดทานการไหลแบบสองสถานะแนวทางการไหล แบบแนวตั้ง.....	46
4.4 รูปแบบการไหล.....	49
4.4.1 รูปแบบการไหลในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวนอน.....	49
4.4.2 รูปแบบการไหลในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลง.....	54
4.4.3 รูปแบบการไหลในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลขึ้น.....	58
4.5 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	64

5.1 สรุปผลการทดลอง.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	70
ภาคผนวก ค.....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าที่ใช้ในการทดลองของไหลสองสถานะในท่อคลื่น.....	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 อิทธิพลของแรงต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ.....	4
รูปที่ 1.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนกับรูปแบบการไหล.....	5
รูปที่ 1.3 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะ น้ำ-อากาศ ในท่อรูปคลื่น..	6
รูปที่ 1.4 รูปแบบการไหลที่ได้จากการถ่าย.....	7
รูปที่ 1.5 รูปแบบการไหลที่แตกต่างกันของ slug flow ในแนวตั้งและแนวนอน.....	8
รูปที่ 1.6 กราฟแสดงความดันลดแต่ละชนิด.....	8
รูปที่ 1.7 กราฟแสดงความดันลดที่เกิดจากการเสียดทานในแต่ละรูปแบบการไหล.....	9
รูปที่ 1.8 กราฟแสดงความดันลดที่เกิดจากการเสียดทานในแต่ละแนวทางการไหล.....	9
รูปที่ 3.1 พารามิเตอร์ด้านบวมไมโครแซแนลของ 1 ลูกคลื่น.....	23
รูปที่ 3.2 พารามิเตอร์ด้านหน้าไมโครแซแนล.....	24
รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง.....	24
รูปที่ 3.4 ภาพฉายด้านบนของฉนวนเรซิน.....	25
รูปที่ 3.5 ภาพฉายด้านข้างของฉนวนเรซิน.....	26
รูปที่ 3.6 ภาพฉายด้านหน้าของทองแดง.....	26
รูปที่ 3.7 การตัดชิ้นงานอะคริลิก.....	27
รูปที่ 3.8 การอัดซิลิโคนและต่อข้อต่อวาล์วทองแดง.....	27
รูปที่ 3.9 แสดงพื้นผิวทองแดงก่อนขัดและหลังขัด.....	28
รูปที่ 3.10 การขัดทองแดง.....	28
รูปที่ 3.11 แสดงการเปลี่ยนแผ่นยางใต้แผ่นโพลีคาร์บอเนต.....	29
รูปที่ 3.12 ถังอะคริลิก.....	29
รูปที่ 3.13 ปืนแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง.....	30
รูปที่ 3.14 เครื่องอัดอากาศ.....	30
รูปที่ 3.15 ตัวควบคุมความดัน.....	31
รูปที่ 3.16 โรตารีมอเตอร์.....	31
รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ผสม.....	32
รูปที่ 3.18 ตัวแปลงสัญญาณแรงดันและจอแสดงผลแบบดิจิตอล.....	32
รูปที่ 3.19 เครื่องบันทึกข้อมูล.....	33
รูปที่ 3.20 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล.....	33
รูปที่ 3.21 เทอร์โมคัปเปิล.....	34
รูปที่ 3.22 ฮีตเตอร์แบบแท่ง.....	34

รูปที่ 3.23 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	35
รูปที่ 3.24 กล้อง Mirrorless.....	35
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลแบบสองสถานะใน แนวนอน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb and Sheader (1983) .....	38
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลแบบสองสถานะใน แนวตั้งแบบไหลลง ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb and Sheader (1983) .....	39
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลแบบสองสถานะใน แนวตั้งแบบไหลขึ้น ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ ของ Kalb and Sheader (1983) .....	40
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนว ทางการไหลแบบแนวนอน.....	42
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนว ทางการไหลแบบแนวตั้งไหลลง.....	43
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนว ทางการไหลแบบแนวตั้งไหลขึ้น.....	43
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อ คลื่นโดยมีแนวทางการไหลในแต่ละแนว.....	44
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับการ ไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวนอน.....	45
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับการ ไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวตั้งไหลลง.....	46
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับ การไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวตั้งไหลขึ้น.....	47
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลแบบสองสถานะ ในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลในแต่ละแนว.....	48
รูปที่ 4.12 แสดงแผนผังรูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะในไมโครแชนแนลรูปคลื่น ที่วางตัวในแนวนอน.....	49
รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow ในแนวนอน.....	51
รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Slug flow ในแนวนอน.....	51
รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Throat-Annular flow ในแนวนอน.....	52
รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Churn flow ในแนวนอน.....	52
รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Annular flow ในแนวนอน.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะในไมโครแชนแนลรูปคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลง.....	54
รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ slug flow ในแนวตั้งไหลลง.....	56
รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Throat-Annular flow แนวตั้งไหลลง.....	56
รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Churn flow ในแนวตั้งไหลลง.....	57
รูปที่ 4.22 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Annular flow ในแนวตั้งไหลลง.....	57
รูปที่ 4.23 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะในไมโครแชนแนลรูปคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลง.....	58
รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow ในแนวตั้งไหลขึ้น.....	60
รูปที่ 4.25 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ slug flow ในแนวตั้งไหลขึ้น.....	60
รูปที่ 4.26 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Throat-Annular flow ในแนวตั้งไหลขึ้น.....	61
รูปที่ 4.27 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ Churn flow ในแนวตั้งไหลขึ้น.....	61
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในไมโครแชนแนลแบบคลื่นที่มีการจัดวางในแนวตั้งแบบไหลขึ้น.....	62
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในไมโครแชนแนลแบบคลื่นที่มีการจัดวางในแนวตั้งแบบไหลลง.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการไหล 2 สถานะของแก๊สและของไหลนอกจากจะเกิดในธรรมชาติแล้ว ยังเกิดโดยมนุษย์โดยนำมาใช้เพื่อระบายความร้อนหรือแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบต่าง ๆ เช่น ไม่ว่าจะเป็นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ระบบทำความเย็น (Cooling system) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Micro-Electro-Mechanical system; MEMEs) อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีในปัจจุบันถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ มากมาย ส่งผลให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการทำงานดีมากขึ้นกว่าเดิม รวมไปถึงอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลง มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา ตลอดจนไปถึงปริมาณการเติมน้ำสารทำงานเข้าไปในระบบน้อยลงเพื่อสอดคล้องกับความต้องการ และเพื่อลดการใช้พลังงาน ซึ่งองค์ประกอบหลักในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพของอุปกรณ์เหล่านี้ก็คือ ไมโครโพรเซสเซอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนขนาดเล็กที่สามารถระบายความร้อนที่มากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งการระบายความร้อนในปัจจุบันส่วนมากจะใช้หลักการของการแผ่รังสี (Radiation), การพาความร้อนแบบอิสระหรือแบบบังคับ (Free convection and Forced convection) การใช้ครีระบายความร้อน การใช้ท่อไมโครที่มีของไหลไหลผ่าน เป็นต้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนไม่ดีพออันเนื่องมาจากข้อจำกัดของคุณสมบัติของของไหล แต่ในปัจจุบันมีการใช้ของเหลวในการระบายความร้อนซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าอากาศ ดังนั้นจึงมีการศึกษาและทดลองเพื่อพัฒนาระบบระบายความร้อนในส่วนนี้ ไม่ว่าจะเป็นการใช้ของไหลจากหนึ่งสถานะเป็นสองสถานะ การปรับเปลี่ยนตัวแปรต้น เช่น รูปแบบการจัดเรียงของท่อ รูปร่างหน้าตัดของท่อ การปรับอัตราการไหล รูปแบบการไหล เป็นต้น ดังนั้น สิ่งที่คาดหวังจากการทำการทดลองครั้งนี้คือ การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดในแต่ละการจัดเรียงท่อซึ่ง แบ่งเป็น 3 กรณี คือ แนวนอน, แนวตั้งไหลลง และแนวตั้งไหลขึ้น ซึ่งเป็นกรไหลแบบ 2 สถานะ (น้ำ-อากาศ) โดยที่ไม่มีการเดือดของของไหลในท่อไมโครรูปคลื่น ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการไหลสถานะเดียวและรูปแบบท่อตรงในวัสดุท่อเดียวกัน ส่วนมากเป็นการศึกษาเชิงตัวเลข ในทำนองเดียวกัน การศึกษาเชิงทดลองมีอยู่ค่อนข้างน้อย ดังนั้นส่วนนี้จึงเป็นเหตุผลที่จะเลือกทำในเชิงทดลองอีกด้วย

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการต่อยอดจากการศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของน้ำ-อากาศในท่อไมโครรูปคลื่นจากสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2561 โดยเปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นน้ำดีไอ ไหลผ่านท่อไมโครแบบโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบแจ้งประสงค์นี้ให้นำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นโคไซน์แบบสองสถานะ วัสดุทำจากทองแดงที่มีค่าการนำความร้อนสูง ฐานหล่อด้วยอีพอกซีเรซินซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนป้องกันการสูญเสียความร้อนจากฮีตเตอร์ด้านล่าง ซึ่งท่อไมโครแต่ละช่องมีพื้นที่หน้าตัดกว้าง 0.8 มม. ลึก 0.5 มม. ความกว้างของครีบ 0.5 มม. ความยาวในแนวตรง 40 มม. มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.62 มม. โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครในแต่ละการจัดวางแนวท่อทั้ง 3 แบบ ได้แก่ ไหลแนวนอน ไหลขึ้นแนวดิ่ง ไหลลงแนวดิ่ง และเปรียบเทียบว่าการไหลในรูปแบบใดให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า ในสภาวะที่อัตราการไหลเท่ากันและฮีทฟลักซ์คงที่ (Constant Heat Flux) โดยให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับจากทั้ง 3 ด้านของช่อง และถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากปลายครีบ (Adiabatic fin tip) ผลการทดลองจะรวมไปถึงการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบและความดันลด ดังนั้นเพื่อที่จะมุ่งเน้นศึกษาเพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการไหลและกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในท่อโค้งขนาดเล็ก

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกที่เกิดขึ้นสำหรับการไหลแบบสองสถานะในท่อไมโครรูปคลื่น
2. เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของการไหลแบบสองสถานะเมื่อมีการจัดวางท่อ 3 แบบ คือ แนวนอน แนวตั้งไหลขึ้น และแนวตั้งไหลลง
3. ศึกษารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในท่อไมโครโค้งคลื่นรูปโคไซน์และเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนในแต่ละรูปแบบการไหล

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลอง
2. ในการทดลองของการไหลสองสถานะของไหลทำงานที่ใช้ คือ น้ำดีไอและอากาศที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการเดือด (non-boiling) และฮีทฟลักซ์คงที่ (constant Heat Flux)
3. ท่อไมโครทำจากทองแดงมีขนาดหน้าตัดกว้าง 0.8 มม. สูง 0.5 มม. จำนวน 26 ช่องสำหรับท่อคลื่น และ 30 ช่องสำหรับท่อตรง โดยท่อทั้งสองแบบมีขนาดความกว้างและความสูงของท่อเท่ากัน ความยาวรวมของทุกท่อเท่ากันคือ 1200 มม. ความกว้างครีบ 0.5 มม. และฐานล่างหล่อด้วยอีพอกซีเรซินที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

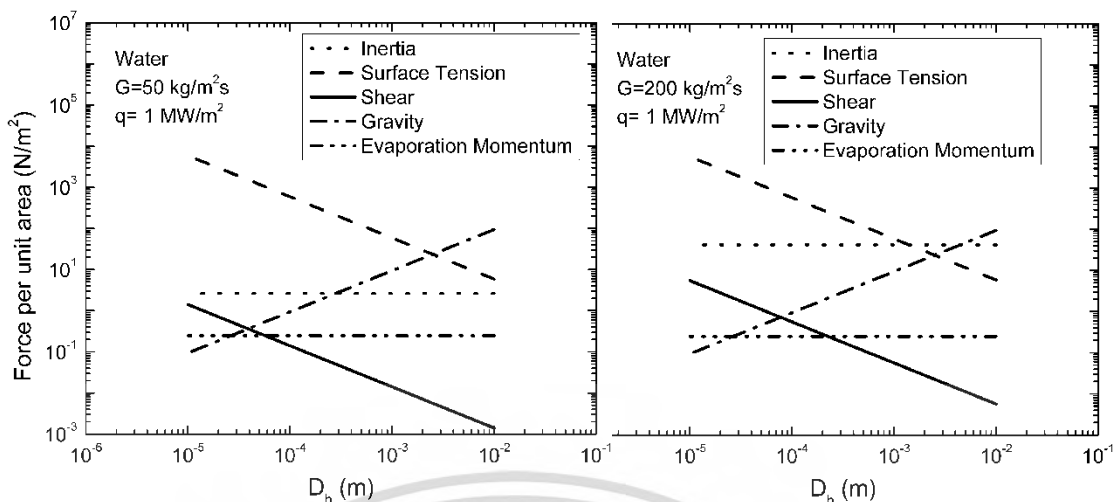
### 1.4.1 ลักษณะการไหลในท่อขนาดเล็ก

ในช่องทางการไหลสองเฟสขนาดนั้น แรงโน้มถ่วงมีอิทธิพลต่อความเค้นเฉือนและแรงตึงผิวสูงมาก แต่สำหรับการไหลสองเฟสในช่องทางการไหลขนาดเล็กมาก ค่าความสัมพันธ์ของแรงโน้มถ่วงจะมีอิทธิพลต่อความเค้นเฉือนและแรงตึงผิวน้อยลง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของแรงต่าง ๆ ที่กล่าวมาด้วย Kreutzer et al. (2005) ได้เสนอการแบ่งระดับขนาดของช่องทางการไหลที่มีรูปแบบการไหลแบบสองเฟสโดยใช้ critical Bond number (Bo) กล่าวได้ว่าสำหรับการใช้น้ำและอากาศเป็นสารทำงานช่องทางการไหลที่มีขนาดเล็กมากนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 มม.

Sur et al. (2012) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลสองสถานะในช่องทางการไหลขนาดเล็กยังขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็วผิว (superficial velocity) ความหนาแน่น (density) ความหนืดของของไหล (viscosity) ดังนั้น รูปแบบการไหลจึงเป็นผลที่เทียบเป็นความเฉื่อย (inertia) ความเค้นเฉือน (viscous shear) แรงเนื่องจากความโน้มถ่วง (gravitational) และแรงตึงผิว (surface tension forces) ในการหาความสัมพันธ์ของแรงเหล่านี้สามารถแสดงได้โดยค่า Reynolds number (Re) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความเฉื่อยกับความหนืด, ค่า capillary number (Ca) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความหนืดกับแรงตึงผิว และค่าเวเบอร์ Weber number (We) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความเฉื่อย (inertia force) กับแรงตึงผิว

Chen et al. (2006) ได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลขณะเดือดของของไหล (flow boiling) พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีขนาดเล็กลง ลักษณะรูปแบบการไหลมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากการไหลในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ ซึ่งผลลัพธ์คือการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลจะไม่สามารถทำนายได้โดยใช้แผนที่การไหล (flow regime map) ของท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่

จากการศึกษาของ Kandlikar. (2010) พบว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรือช่องทางการไหลมีขนาดเล็กลง จะส่งผลให้อิทธิพลการของแรงโน้มถ่วงที่มีผลต่อการไหลของของไหลจะน้อยลง และอิทธิพลของแรงตึงผิวจะเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 อิทธิพลของแรงต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Kandlikar 2010)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ให้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) แต่เนื่องจากการไหลผ่านช่องท่อไมโครส่วนมากจะเกิดการไหลแบบราบเรียบหรือแบบทรานซิชันเท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะหาวิธีในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ได้มากขึ้น การค้นหากลไกดังกล่าวได้เกิดขึ้นต่อมาในรูปแบบของงานจำนวนมากทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการศึกษาเชิงการทดลอง

#### 1.4.2 ลักษณะการไหลในท่อโค้งขนาดเล็ก

จากการศึกษาการไหลของของไหลผ่านท่อคดโค้ง จะทำให้เกิดการไหลทุติภูมิ (Secondary flow) หรือกระแสการหมุน (Dean vortices) ซึ่งเกิดจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เสริมให้เกิดการยึดและหดของกระแสการไหล และยังช่วยให้ของไหลเกิดการผสมกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครที่มีลักษณะคดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น และการพัฒนาของกระแสการหมุนนำไปสู่ Chaotic advection เกิดจากเหตุผลหลักคือ ท่อคดโค้งรูปโคไซน์ดังเช่นการทดลองที่ผ่านมา ส่วนโค้งของท่อเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายบวกและลบ ตามระยะทางของการไหลเป็นผลให้แรงหนีศูนย์กลางเกิดการเปลี่ยนทิศส่งผลให้กระแสการหมุนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยึด หด และพัฒนาจนเกิดการพาแบบยุ่งเหยิงขึ้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเนื่องจากการไหลในท่อไมโครนั้นส่วนใหญ่เป็นแบบราบเรียบ ดังนั้นการที่จะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นต้องขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของของไหลภายในท่อเป็นหลัก อีกทั้งเมื่อตัวเลขเรย์โนลสูงขึ้นในผลของการไหลในท่อคดโค้งรูปไซน์ กระแสการหมุนทำให้เกิดการרבวอนของอนุภาคของไหลซึ่งเป็นผลทำให้เกิด Chaotic advection จึงเป็นกลไก

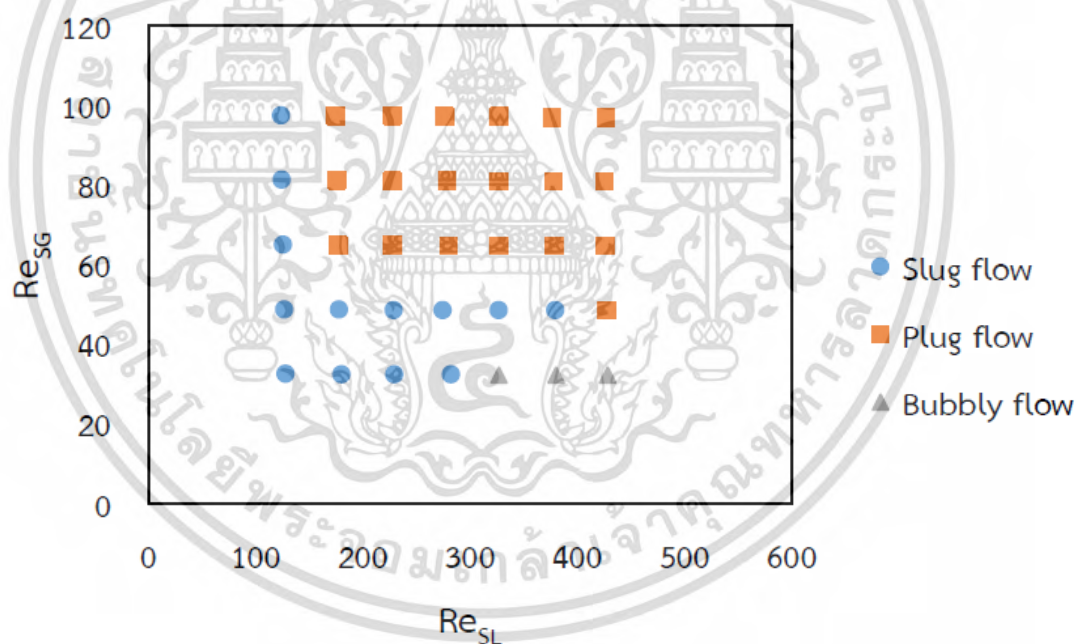
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โนลของแก๊สและค่าเลขเรย์โนล ของของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลเกิดความปั่นป่วนที่มากขึ้นทำให้มีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย

#### 1.4.3.2 การไหลในท่อคลื่น

พลรัตน์ กลิ่นดี, มาวิน คณะบุตร และ ศุภกิตติ รื่นรัมย์ (2019) ได้ทำการศึกษาทดลองการไหลแบบสองสถานะภายในท่อไมโครรูปคลื่นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 0.8 มม. ความสูง 0.5 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.62 มม. มีจำนวนท่อทั้งหมด 26 ท่อ โดยให้พลั๊กซ์ความร้อนที่พื้นผิววงที่ ทำการทดลองที่ค่าเลขเรย์โนล ของของเหลวอยู่ในช่วง 108 ถึง 427 และค่าเลขเรย์โนลของก๊าซอยู่ในช่วง 28 ถึง 97 จากการทดลองพบว่า มีรูปแบบการไหลเกิดขึ้นในท่อไมโครรูปคลื่น ทั้งหมด 3 รูปแบบ คือการไหลแบบ slug, plug และ bubbly ซึ่งสามารถแสดงแผนที่รูปแบบการไหลได้ดังรูป



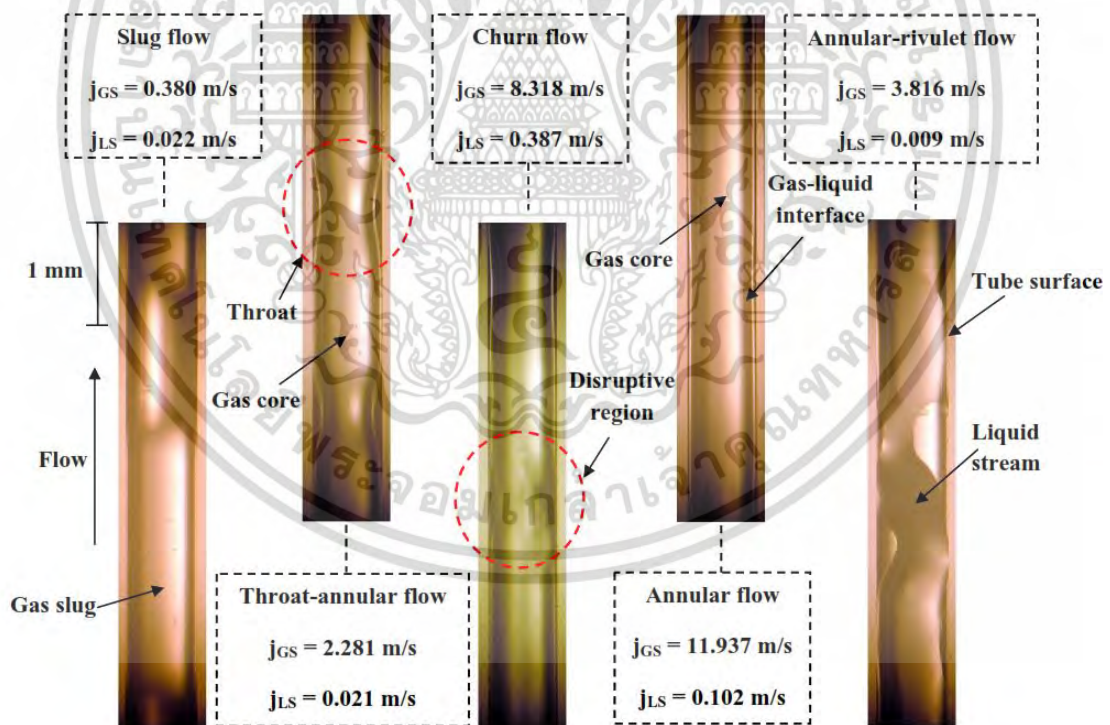
รูปที่ 1.3 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะ น้ำ-อากาศ ในท่อรูปคลื่น (พลรัตน์ กลิ่นดี, มาวิน คณะบุตร และ ศุภกิตติ รื่นรัมย์, 2019)

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างช่องทางการไหลแบบท่อคลื่นกับช่องทางการไหลแบบท่อตรง จากการทดลองสามารถพบได้ว่าช่องทางการไหลแบบคลื่นจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าช่องทางการไหลแบบท่อตรงในทุกกรณี เนื่องจากลักษณะการไหลของท่อไมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครแบบรูปคลื่น ทำให้เกิดการผสมกันของของไหลได้ดีมากกว่าท่อไมโครแบบท่อตรง รวมไปถึงผลของการผสมกันของน้ำและอากาศ ที่มีอากาศเป็นส่วนช่วยให้ของไหลผสมกันได้ดีขึ้น สร้างความปั่นป่วนและการรบกวนของชั้นขอบเขตการไหล แต่เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ของก๊าซมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนของท่อไมโครแบบคลื่นมีแนวโน้มที่ลดลง

#### 1.4.4 การถ่ายเทความร้อนในท่อแนวตั้งและรูปแบบการไหลของของไหล 2 สถานะ

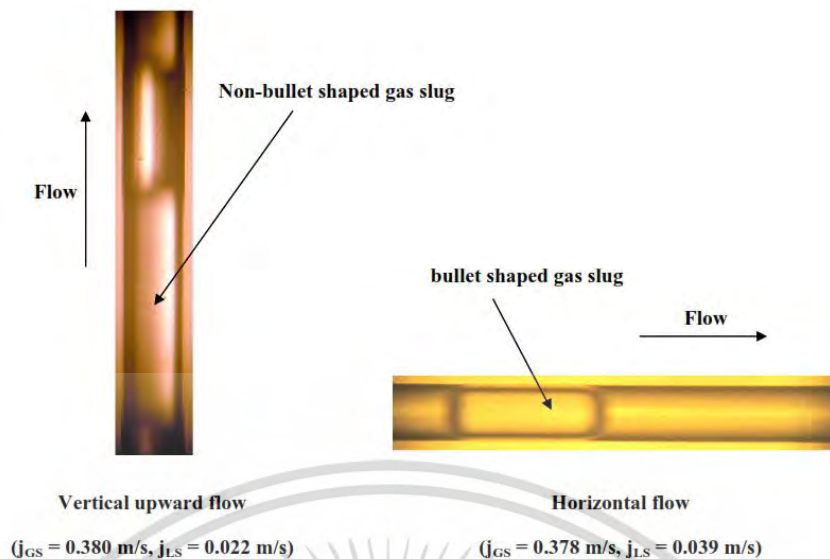
จากการศึกษา Saisorn and Wongwises (2015) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของไหล 2 สถานะแก๊ส-ของเหลวในท่อกลมขนาดเล็กในแนวตั้งที่ทำจากซิลิกามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มม. ยาว 320 มม. พบว่าได้รูปแบบการไหลของของไหล 2 สถานะแตกต่างกัน 5 รูปแบบ ได้แก่ slug, throat-annular, churn, annular และ annular-rivulet และรูปแบบการไหลแบบ slug นั้น จะแตกต่างจากลักษณะของกระสุน (bullet shape) ที่พบในท่อแนวนอน เนื่องจากจะถูกทำให้เสียรูประหว่างการไหลขึ้นของของผสม ดังรูปที่ 1.2 และรูปที่ 1.3 และการไหลขึ้นในท่อแนวตั้งให้ค่าความดันลดที่สูง



กว่าการไหลในท่อแนวนอน

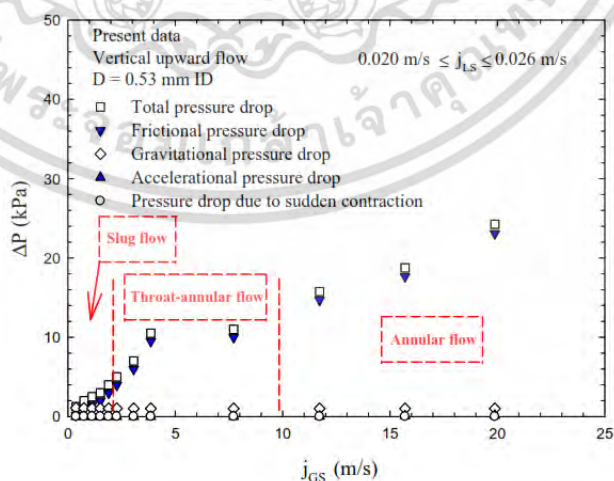
รูปที่ 1.4 รูปแบบการไหลที่ได้จากการถ่าย (Saisorn and Wongwises, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



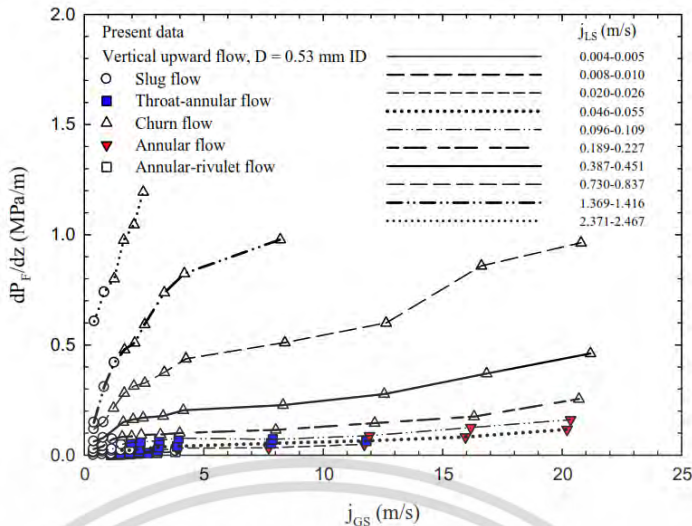
รูปที่ 1.5 รูปแบบการไหลที่ต่างกันของ slug flow ในแนวตั้งและแนวนอน (Saisorn and Wongwises, 2015)

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาเรื่องความดันลด ซึ่งอธิบายว่าความดันลดที่เกิดขึ้นมีเหตุมาจาก 5 ประเภทได้แก่ ความดันลดที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างของไหลกับผิวสัมผัส ความดันลดที่เกิดจากความเร่งของของไหล ความดันลดที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง และความดันลดที่หดตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นยังได้อธิบายว่าความดันลดที่เกิดจากการหดตัวมีค่าน้อยกว่า 6% จากความดันลดรวมทั้งหมดซึ่งมีค่าน้อยมาก ซึ่งโดยปกติแล้วความดันลดที่เกิดจากการเสียดทานจะมีค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบจากความดันลด 3 ประเภทที่เหลือ แต่จากรูปที่ 1.4 ในภาวะที่อัตราการไหลน้อย ได้ค่าเฉลี่ยความดันลดที่เกิดจากการเสียดทานและแรงโน้มถ่วงประมาณ 51.6% และ 48.1% ตามลำดับ

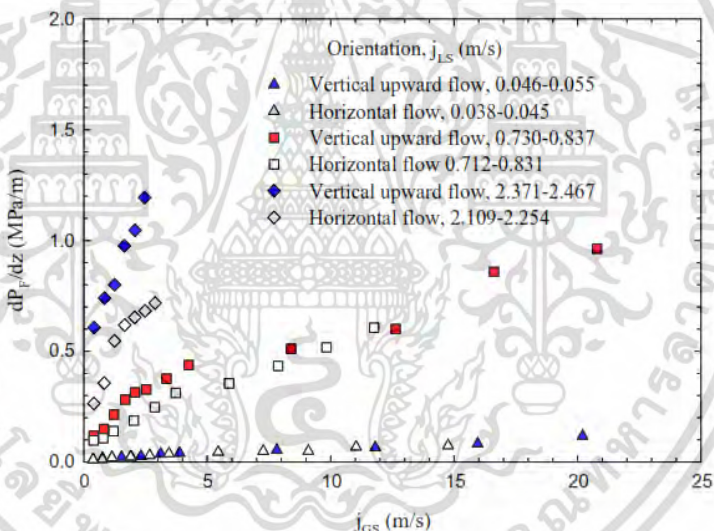


รูปที่ 1.6 กราฟแสดงความดันลดแต่ละชนิด (Saisorn and Wongwises, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.7 กราฟแสดงความดันตกที่เกิดจากการเสียดทานในแต่ละรูปแบบการไหล (Saisorn and Wongwises, 2015)



รูปที่ 1.8 กราฟแสดงความดันตกที่เกิดจากการเสียดทานในแต่ละแนวทางการไหล (Saisorn and Wongwises, 2015)

Kandlikar. (2005) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะที่มีการเดือดโดยใช้น้ำในมินิแชนแนลที่ขนานกัน 6 ท่อ แบ่งเป็น 3 แนวได้แก่ แนวนอน แนวตั้งแบบไหลลง แนวตั้งแบบไหลขึ้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 333  $\mu\text{m}$  กว้าง 1054  $\mu\text{m}$  ยาว 63.5  $\mu\text{m}$  ลึก 197  $\mu\text{m}$  จากการทดลองพบว่า รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะในท่อแนวนอนมีรูปแบบที่ต่างกัันอยู่ 3 แบบ คือ churn, plug, และ wavy ส่วนในท่อแนวตั้งแบบไหลลงมี 5 แบบคือ churn,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bubble, slug, annular และ wavy ส่วนในท่อแนวตั้งแบบไหลขึ้นมี 2 แบบ คือ bubble และ annular ซึ่งการไหลของของไหลสองสถานะในแนวตั้งแบบไหลขึ้นจะให้ค่าความดันตกที่ต่ำเมื่อเทียบกับแนวตั้งแบบไหลลงและแนวนอน แต่ในทางกลับกันจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่สูงกว่า

Saisorn et al. (2018) ยังได้ทำการศึกษาความแตกต่างของรูปแบบการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกในท่อมินิแซแนลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. โดยมีการเดือดในแนวตั้งและแนวนอน โดยใช้สารทำงาน R-134a โดยกำหนดให้ฮีทฟลักซ์คงที่ โดยรูปแบบการไหลที่ได้มีรูปแบบดังนี้ slug, throat-annular, churn, annular และ annular-rivulet ทั้งหมดนี้ถูกพบจากการไหลทั้งสามแนว อย่างไรก็ตามรูปแบบการไหลแบบ slug และ churn ที่พบได้จากแนวนอนนั้น ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับแนวตั้งได้อย่างสมบูรณ์ จากทั้งสามแนวเมื่อเทียบกันแล้วการไหลลงนั้น จะให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแต่การไหลของของไหลที่มีการเดือดในแนวตั้งแบบไหลขึ้นโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบปานกลางและมีค่าความดันตกที่ต่ำ จากผลลัพธ์ดังกล่าวจะเห็นว่า การไหลในแนวตั้งที่มีการไหลขึ้นเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับอุปกรณ์ทำความเย็น

#### 1.4.5 ความดันตกในช่องทางการไหลแบบสองสถานะ

Suwankamnerd และ Wongwises (2014) แบบจำลองที่เหมาะสมแก่การทำนายความดันตกในรูปแบบการไหลแบบสองเฟสมีด้วยกันสองแบบจำลอง คือ การไหลแบบเนื้อเดียว (homogeneous flow model) และแบบจำลองการไหลแบบแยกส่วน (separated model) โดยแบบจำลองการไหลเนื้อเดียวถือว่าการไหลในแต่ละสถานะเป็นเนื้อเดียวกัน โดยแบบจำลองนี้เหมาะกับรูปแบบการไหลที่มีการแบบสองเฟสที่ไม่สม่ำเสมอและในส่วนของการไหลแบบแยกส่วนจะพิจารณาว่าของไหลทั้งสองเฟสไม่ได้รวมเป็นเนื้อเดียวกันและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน จากที่นักวิจัยหลายๆคนได้มีการประยุกต์ใช้การไหลแบบต่างๆเพื่อหาความดันตก ต่อมาได้มีการค้นพบว่าการใช้รูปแบบการไหลสามารถทำนายได้ดีกว่าการใช้แบบจำลอง การไหลแบบแยกส่วนและแบบจำลองการไหลแบบเนื้อเดียว อย่างไรก็ตามการทำนายที่ให้ค่าแม่นยำมากกว่าการทดลองและแม่นยำมากที่สุดคือการคำนวณโดยใช้สมการที่ถูกคิดค้นขึ้น

Sui Y. et al. (2011) ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครแบบคลื่นที่มีพื้นที่หน้าตัดรูปร่างสี่เหลี่ยมและการเสียดทานเนื่องจากการไหลท่อไมโครแบบคลื่นให้ประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนได้ดีแต่ความดันตกมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อตรงส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของค่าที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณอยู่ที่ 10%, 6% และ 8% ของแอมพลิจูดของท่อคลื่นที่มีค่า 0 ไมครอน, 138 ไมครอน และ 259 ไมครอน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 รูปแบบการไหลของของไหลแบบสองสถานะในช่องทางการไหลขนาดเล็ก

จากงานวิจัยที่มีมา การศึกษาลักษณะการไหลสองสถานะของของไหลในช่องทางขนาดเล็กสามารถแบ่งการศึกษาผลการวิจัยออกเป็น รูปแบบการไหลแบบสองสถานะและแผนผังที่รูปแบบการไหลและอัตราส่วนช่องว่าง (void fraction) ซึ่งรูปแบบการไหลมีผลโดยตรงต่อความดันลดและการถ่ายเทความร้อน

การไหลแบบสองเฟสระหว่างแก๊สและของเหลวสามารถจำแนกได้เป็นพื้นฐาน ดังนี้

1. stratified flow มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยก๊าซจะอยู่บนและของเหลวอยู่ล่างโดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะราบเรียบ



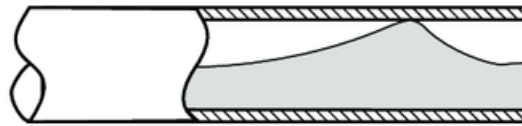
Stratified flow

2. wavy flow มีลักษณะของเหลวและแก๊สชั้นกัน โดยแก๊สจะอยู่บน และของเหลวจะอยู่ล่าง โดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะเป็นคลื่น



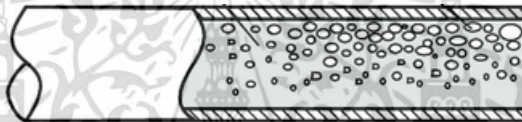
wavy flow

3. slug flow เกิดเมื่อคลื่นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นของแก๊สและของเหลวใน wavy flow เกิดสูงขึ้นจนยอดคลื่นถึงผนังด้านบนของท่อ



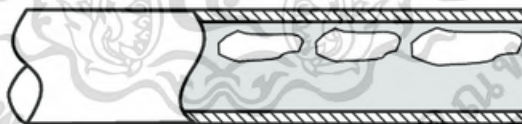
Slug flow

4. bubbly flow มีลักษณะการไหลเป็นฟองแก๊สขนาดเล็ก ไหลอยู่ค่อนไปทางส่วนบนของท่อ เนื่องจากฟองแก๊สมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวส่งผลให้ลอยตัวขึ้น



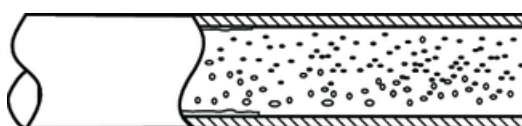
Bubbly flow

5. plug flow เกิดจากการรวมตัวกันของฟองแก๊สขนาดเล็กหลาย ๆ ลูกของ bubbly flow ทำให้เกิดเป็นฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่ และยาวขึ้น



Plug flow

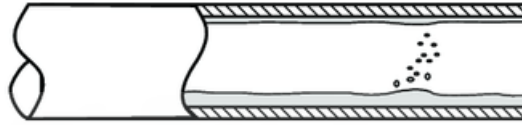
6. droplet flow มีลักษณะการไหลที่เหมือนกับ bubbly flow แต่มีขนาดของฟองอากาศที่เล็กกว่ามาก



Mist flow

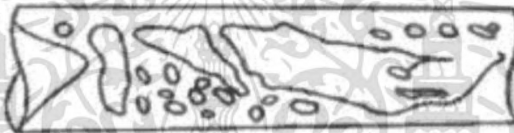
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. annular flow เป็นลักษณะของเหลวไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ โดยความหนาของชั้นฟิล์มของของเหลวด้านล่างจะหนากว่าชั้นบน และอาจมีละอองของของเหลวเคลื่อนที่กระจายอยู่ในแก๊สซึ่งเคลื่อนที่อยู่บริเวณแกนกลางของท่อ



Annular flow

8. churn flow มีลักษณะการไหลคล้ายกับ Annular flow และจะมีบริเวณที่เรียกว่า Disruptive region ซึ่งมีน้ำเข้ามาแทรกตรงแกนกลางบางช่วง



Churn flow

อัตราส่วนช่องว่าง (void fraction,  $\alpha$ ) คือ อัตราส่วนของพื้นที่ที่ก๊าซครอบงำอยู่ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของช่องทางการไหล หรือปริมาตรที่ของเหลวครอบงำอยู่ต่อปริมาตรทั้งหมดของท่อ ในช่วงความยาวที่กำลังพิจารณา โดยอัตราส่วนช่องว่างสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\alpha = \left[ 1 + \frac{J_l}{J_g} \left( \frac{1-x}{x} \right) \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{-1} \quad (2.1)$$

$$\alpha = 0.833\beta$$

เมื่อ  $J_l, J_g$  คือ ความเร็วที่ผิวของของเหลวและแก๊ส

$x$  คือ อัตราส่วนเชิงมวล

$\rho_l, \rho_g$  คือ ความหนาแน่นของของเหลวและแก๊ส

$\beta$  คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การไหลของของไหลสองสถานะ

### 2.2.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลแบบสองสถานะ

ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลแบบสองสถานะจะถูกแบ่งออกเป็น ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของก๊าซ และ ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของของเหลว

ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของก๊าซ (Superficial gas Reynolds number)

$$\text{Re}_G = \frac{\rho_G J_G D_h}{\mu_G} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\rho_G$  คือความหนาแน่นของแก๊ส,  $J_G$  คือความเร็วผิวของแก๊ส,  $\mu_G$  คือความหนืดจลน์ของแก๊สที่อุณหภูมิเฉลี่ย

ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของของเหลว (Superficial liquid Reynolds number)

$$\text{Re}_L = \frac{\rho_L J_L D_h}{\mu_L} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\rho_L$  คือความหนาแน่นของแก๊ส,  $J_L$  คือความเร็วผิวของแก๊ส,  $\mu_L$  คือความหนืดจลน์ของแก๊สที่อุณหภูมิเฉลี่ย

ความเร็วผิว (Superficial velocity,  $J$ ) คือความเร็วของของไหลนั้น ๆ เมื่อพิจารณาว่าของไหลสถานะนั้นไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลทุกสถานะรวมกัน คำนวณได้จากสมการดังนี้

ความเร็วผิวของแก๊ส (Superficial velocity of gas,  $J_G$ )

$$J_G = \frac{G_G}{\rho_G} = \frac{\dot{m}_G}{A \rho_G} \quad (2.4)$$

ความเร็วผิวของของเหลว (Superficial velocity of liquid,  $J_L$ )

$$J_L = \frac{G_L}{\rho_L} = \frac{\dot{m}_L}{A \rho_L} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\dot{m}_G$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส,  $\dot{m}_L$  คืออัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว,  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของไหลทุกสถานะรวมกัน

ตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะ

$$\text{Re}_{TP} = \frac{G_{TP} D_h}{\mu_{TP}} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $G_{TP}$  คือ ฟลักซ์มวลของของไหลสองสถานะ และ  $\mu_{TP}$  คือ ความหนืดจลน์ของของไหลสองสถานะ

$$G_{TP} = G_L + G_G = \rho_L J_L + \rho_G J_G \quad (2.7)$$

$$\text{อัตราส่วนเชิงมวล } x \text{ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ } x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (2.8)$$

## 2.2.2 รูปแบบการไหลแบบเป็นเนื้อเดียวกัน

รูปแบบการไหลแบบเป็นเนื้อเดียวกัน ได้มีการสมมุติว่าที่สถานะของแก๊สและของเหลวมีการผสมกันที่เป็นไปอย่างดีและมีความสม่ำเสมอ จนของผสมสองสถานะสามารถมองได้ว่าเป็นของไหลสถานะเดียว

ค่าความหนืดเชิงจลน์ ในรูปแบบการไหลแบบเป็นเนื้อเดียวกัน ได้มีผู้ที่ศึกษาวิจัยแล้วสรุปสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความหนืดเชิงจลน์แตกต่างกันถึง 6 สมการ ดังต่อไปนี้

$$\text{McAdams et al.} : \mu_{TP} = \left( \frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

$$\text{Owen} : \mu_{TP} = \mu_L \quad (2.10)$$

$$\text{Dukler et al.} : \mu_{TP} = \beta \mu_G + (1-\beta) \mu_L \quad (2.11)$$

$$\text{Beattie and Whalley} : \mu_{TP} = \beta \mu_G + (1-\beta)(1+2.5\beta) \mu_L \quad (2.12)$$

$$\text{Lin et al.} : \mu_{TP} = \frac{\mu_G \mu_L}{\mu_G + x^{1.4} (\mu_L - \mu_G)} \quad (2.13)$$

$$\text{Awad and Muzychka} : \mu_{TP} = \frac{2\mu_G + \mu_L - 2(\mu_G - \mu_L)(1-x)}{2\mu_G + \mu_L + (\mu_G - \mu_L)(1-x)} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การถ่ายเทความร้อน

### 2.3.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์

ค่าตัวแปรไร้มิติของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนซึ่งหาได้จากค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2 \cdot K$ )

$D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ( $m$ )

$k_f$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ย ( $W/m \cdot K$ )

### 2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จะต้องทราบพลັกซ์ความร้อนผิวของท่อไมโคร และต้องหาค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อไมโครซึ่งสามารถหาค่าได้จากวิธีการประมาณค่านอกช่วง โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลหาได้จาก

$$h = \frac{\dot{Q}}{N(A_{ch} + 2A_{cs}\eta)(T_w - T_m)} \quad (2.16)$$

$$A_{cb} = S_c L_t$$

$$A_{cs} = 2(H_f L_t)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนช่องท่อไมโครทั้งหมด (ช่อง)

$A_{ch}$  คือ พื้นที่ด้านข้างที่ใช้ในการหาความร้อนแต่ละช่อง ( $m^2$ )

$A_{cs}$  คือ พื้นที่ด้านข้างที่ใช้ในการหาความร้อนแต่ละช่อง ( $m^2$ )

$\eta$  คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบ (%)

$T_w$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่พื้นผิวของท่อไมโคร หาได้จากการประมาณค่านอกช่วง (K)

$T_m$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทำงาน (K)

$L_t$  คือ ความยาวทั้งหมดของแต่ละช่อง (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ค่าฟลักซ์ความร้อน

ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ออกจากผนังของครีปหาได้จากปริมาณความร้อนทั้งหมดของของเหลวรวมกับก๊าซ

$$\dot{Q} = (\dot{m}_l c_{p,l} + \dot{m}_g c_{p,g})(T_{out} - T_{in}) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\dot{m}_l, \dot{m}_g$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวและก๊าซ (kg/s)

$c_{p,l}, c_{p,g}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลวและก๊าซ (J/kg·K)

$T_{out}, T_{in}$  คือ อุณหภูมิที่ขาออกและขาเข้า (K)

### 2.3.4 ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีป

สำหรับการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีปนั้น สามารถใช้เงื่อนไขว่าไม่มี การถ่ายความร้อนที่ปลายครีป (Adiabatic fin tips) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $H_f$  คือ ความสูงของครีป (m)

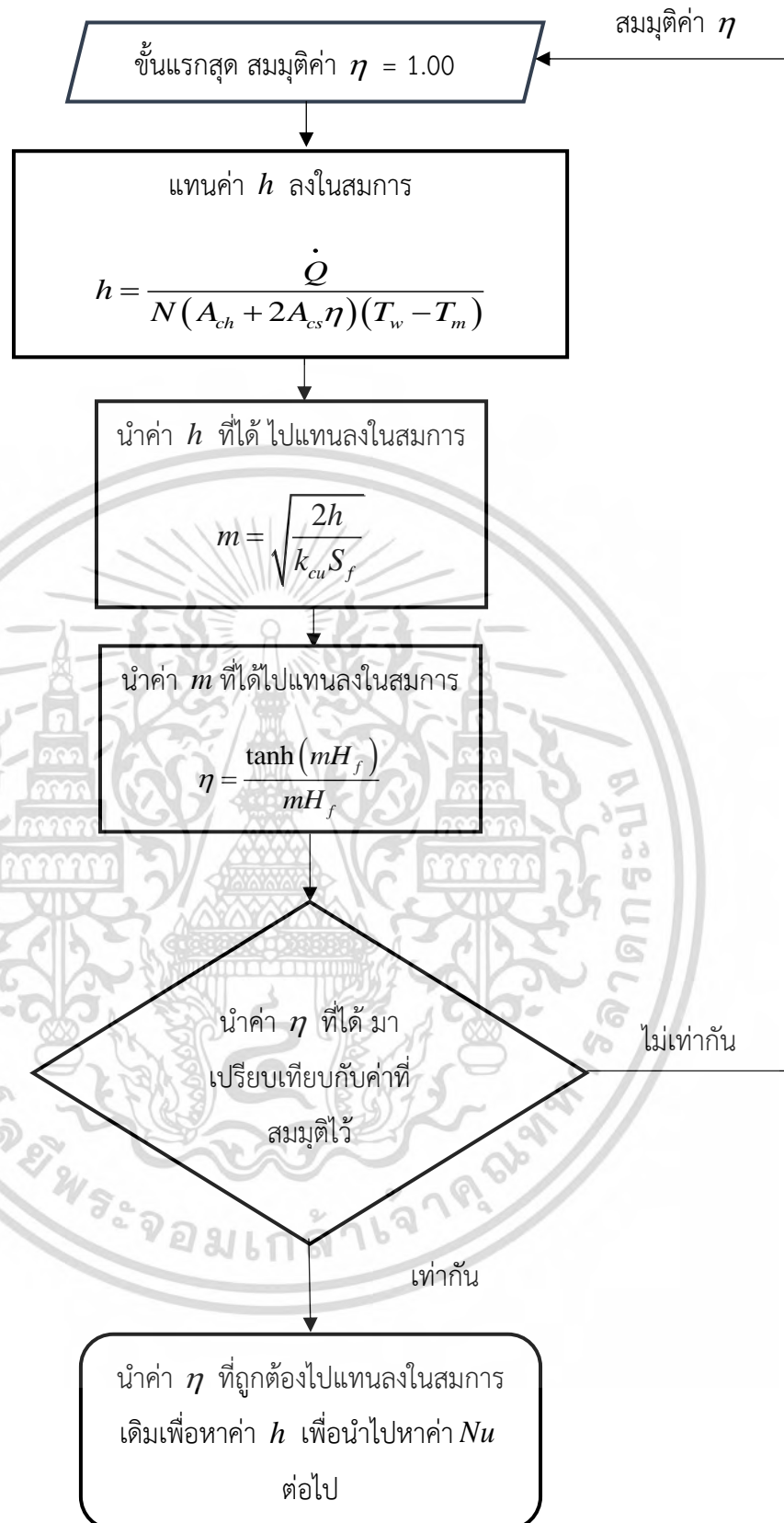
$m$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งถูกนิยามไว้ดังนี้

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_{cu} S_f}} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $k_{cu}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองแดง (W/m·K)

$S_f$  คือ ความหนาของครีป (m)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีป จำเป็นที่จะต้องอาศัย กระบวนการทำซ้ำ (Iteration process) ในการประมาณค่า ซึ่งวิธีการนี้ถูกนำเสนอโดย Lee et al. โดยใช้ขั้นตอนการทำซ้ำดังแผนภาพต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อคลื่น

#### 2.3.4.1 ค่าตัวเลขดีน (Dean number)

ตัวเลขดีนเป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการศึกษาการไหลที่เกิดขึ้นในท่อที่มีความโค้ง โดยตัวเลขดีนถูกตั้งชื่อตาม W.R.Dean นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษผู้ที่ทำการพิสูจน์เกี่ยวกับพลศาสตร์การไหลในท่อโค้งที่มีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ โดยการใช้การประมาณจากสมการ Navier-Stokes Equation ทำให้ Dean สามารถแสดงให้เห็นว่าในการไหลของของไหลในท่อโค้งจะเกิดผลของแรงหนีศูนย์กลาง ที่จะทำให้เกิดการไหลทุติยภูมิที่ ในระนาบภาคตัดขวางของท่อ โดยการเกิดปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับค่าดีน

ค่าตัวเลขดีนถูกนิยามจากสมการดังต่อไปนี้

$$De = Re_{TP} \sqrt{\frac{D_h}{2R_c}} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $Re$  คือ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะ

$D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของแขนแนล (m)

$R_c$  คือ รัศมีความโค้งของเส้นทางการไหลแขนแนล (m)

#### 2.3.4.2 ค่าตัวเลขพรีน့်เทิลของการไหลแบบสองสถานะ

ค่าตัวเลขพรีน့်เทิลเป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการนิยามอัตราส่วนระหว่างการแพร่เชิงโมเมนตัมกับการแพร่ของอุณหภูมิหรือการนำความร้อนของของไหล ตัวเลขพรีน့်เทิลสามารถนิยามจากสมการดังต่อไปนี้

$$Pr_{TP} = \frac{\mu_{TP} c_{p,TP}}{k_L} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\mu_{TP}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเชิงจลน์ของของไหลสองสถานะ (kg/m·s)

$c_{p,TP}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยสองสถานะ (J/kg·K)

$k_L$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของเหลว (W/m·K)

### 2.3.4.3 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อคลื่น

Kalb and Sheader (1983) ได้มีการนำเสนอสมการสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยในกรณีที่เกิดการไหลแบบราบเรียบในท่อโค้ง ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือดที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ ดังสมการต่อไปนี้

$$Nu_{TP} = 0.913De^{0.476} Pr_{TP}^{0.2} \quad (2.22)$$

$$\text{โดยที่} \quad \begin{aligned} 0.7 < Pr < 5 \\ 80 < De < 1200 \end{aligned}$$

## 2.4 ความดันตกในช่องทางการไหลแบบสองสถานะ

ความดันตกคร่อมทั้งหมดสำหรับการไหลสองสถานะในชุดทดสอบ สามารถถูกวัดได้โดยเครื่องวัด ความดันที่ติดตั้งไว้ระหว่างทางเข้า และทางออกของชุดทดสอบ โดยความดันตกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย ความดันตกเนื่องจากแรงเสียดทาน, ความดันตกเนื่องจากความเร่ง, ความดันตกที่เกิดจากการหดตัวของของไหลที่ทางออก, ความดันตกที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลที่ทางเข้า และ ความดันตกเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งสามารถพิจารณาส่วนประกอบทั้งหมดจากสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_f + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{ace} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_c + \left(\frac{dP}{dz}\right)_e + \left(\frac{dP}{dz}\right)_g \quad (2.23)$$

### 2.4.1 ความดันตกเนื่องจากแรงเสียดทาน

ความดันตกเนื่องจากแรงเสียดทานเป็นความดันตกที่เกิดจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวของของไหลกระทำกับส่วนผนังของท่อ โดยสามารถนิยามจากสมการดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{friction} = f_{TP} \frac{1}{D_h} \frac{G^2}{2\rho_{TP}} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $f_{TP}$  คือ ตัวประกอบความเสียดทานของการไหลแบบสองสถานะ

$G$  คือ ฟลักซ์มวลของของไหลสองสถานะ ( $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ )

$\rho_{TP}$  คือ ความหนาแน่นของของไหลสองสถานะ ( $\text{kg/m}^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2 ความดันลดเนื่องจากความเร่ง

ความดันลดเนื่องจากความเร่งเป็นความดันลดที่เกิดจากการปรับอัตราการไหลของของไหลให้เพิ่มขึ้นทั้งสองสถานะ หรือจะเกิดขึ้นที่ของเหลวและก๊าซที่มีความเร็วสูง สามารถนิยามได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{Acceleration} = G^2 \left[ \left( \frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{outlet} - \left( \frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{inlet} \right] \quad (2.25)$$

เมื่อ  $x$  คือ อัตราส่วนเชิงมวล

$\alpha$  คือ อัตราส่วนช่องว่าง

$\rho_G, \rho_L$  คือ ความหนาแน่นของแก๊สและของเหลว ( $\text{kg/m}^3$ )

### 2.4.3 ความดันลดเนื่องจากการลดและขยายขนาดช่องทางพื้นที่การไหล

ความดันลดเนื่องจากการลดและขยายขนาดช่องทางพื้นที่การไหล สามารถแบ่งได้เป็นความดันลดที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลเมื่อไหลจากช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กเข้าไปสู่ช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่กว่าก่อนที่จะแบ่งเข้าสู่ท่อไมโคร และความดันลดที่เกิดจากการหดตัวของของไหลเมื่อไหลจากช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ไหลออกมาสู่ช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กกว่า

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{contraction} = \frac{G^2}{2\rho_L} \left[ \left( \frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 + \left( 1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \left[ 1 + \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) x \right] \quad (2.26)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{expansion} = G^2 \gamma (\gamma - 1) \left[ \frac{1-x^2}{\rho_L (1-\alpha)} + \frac{x^2}{\alpha \rho_G} \right] \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อที่เชื่อมต่อกับท่อ

$C_c$  คือ สัมประสิทธิ์การหดตัว ซึ่งคำนวณได้จากสมการสหสัมพันธ์ของ Chisholm ดังต่อไปนี้

$$C_c = \frac{1}{0.639 \left[ 1 + \frac{1}{\gamma} \right]^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.4 ความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravitational pressure drop)

ความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเกิดขึ้นเมื่อมีการวางช่องทางการไหลให้ไหลในแนวตั้ง ทำให้เกิดผลจากแรงโน้มถ่วงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย สามารถนิยามได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{gravitational}} = gL \sin \theta (\alpha \rho_G + (1-\alpha) \rho_L) \quad (2.29)$$

เมื่อ  $g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $\text{m/s}^2$ )

$L$  คือ ค่าความยาวของเซนแนล ( $\text{m}$ )

$\theta$  คือ มุมระหว่างท่อกับระดับอ้างอิง

#### 2.5 ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Performance index, PI)

ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เป็นค่าที่ใช้ชี้วัดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในทางปฏิบัติจริงซึ่งก็คือความดันลดที่ส่งผลให้ปั๊มน้ำและอากาศต้องสร้างกำลังงานที่เพิ่มมากขึ้น โดย Hashemi et al. (2012) ได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนไว้ดังต่อไปนี้

$$PI = \frac{Nu_{\text{vertical}} / Nu_{\text{horizontal}}}{\Delta P_{\text{vertical}} / \Delta P_{\text{horizontal}}} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $Nu_{\text{vertical}}$  ,  $Nu_{\text{horizontal}}$  คือ ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของการไหลแนวตั้งและแนวนอน

$\Delta P_{\text{vertical}}$  ,  $\Delta P_{\text{horizontal}}$  คือ ความดันลดของการไหลแนวตั้งและแนวนอน (Pa)

หากในสถานะหนึ่งค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าหนึ่งจะบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนที่มีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลด ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่ามีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีแม้จะมีการสูญเสียกำลังงานจากปั๊มที่เพิ่มขึ้น มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริง แต่ถ้าค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าหนึ่งจะบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนที่มีค่าน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลด ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง เพราะว่าเมื่อใช้งานไปเรื่อย ๆ ปั๊มน้ำและอากาศจะต้องเพิ่มกำลังงานที่ต้องใส่เข้าไป แต่ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงาน

##### 3.1 วงจรการทำงานและรายละเอียดของชุดทดลอง

##### 3.1.1 คุณสมบัติของท่อคลื่นไมโครแซแนล

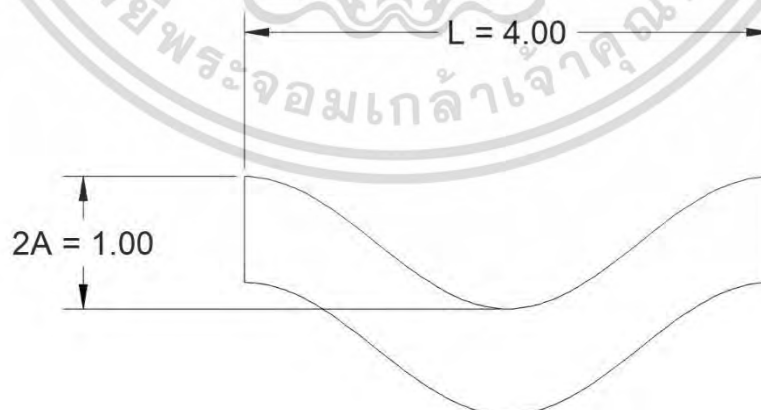
สำหรับท่อคลื่นท่อไมโคร 1 ช่องจะมีสัดส่วนความสูงของครีป ( $H_f$ ) เท่ากับ 0.5 มม. ความกว้างของช่อง ( $S_c$ ) เท่ากับ 0.8 มม. และความหนาของของครีป ( $S_f$ ) เท่ากับ 0.5 มม. มีความยาวรวม ( $L_f$ ) 40 มม. แต่ละช่องมีค่าแอมพลิจูด ( $A$ ) เท่ากับ 0.5 มม. และมีทั้งหมด 10 คาบ (Period) โดยมีจำนวนทั้งหมด 26 ช่อง ดังรูปและมีพิกัดแกนกลางของช่องท่อไมโครแต่ละช่องในแนวราบเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$y = A \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูดของคลื่น (m)

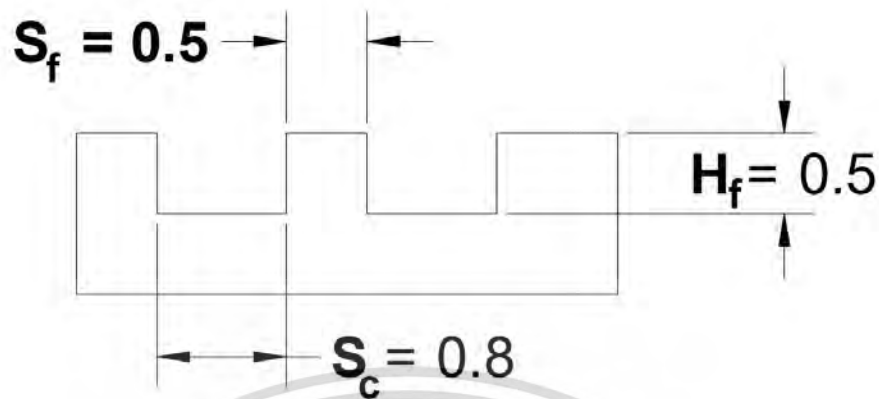
$x$  คือ ระยะตามแนวแกนระดับของการไหล (m)

$L$  คือ ความยาวคลื่น (m)



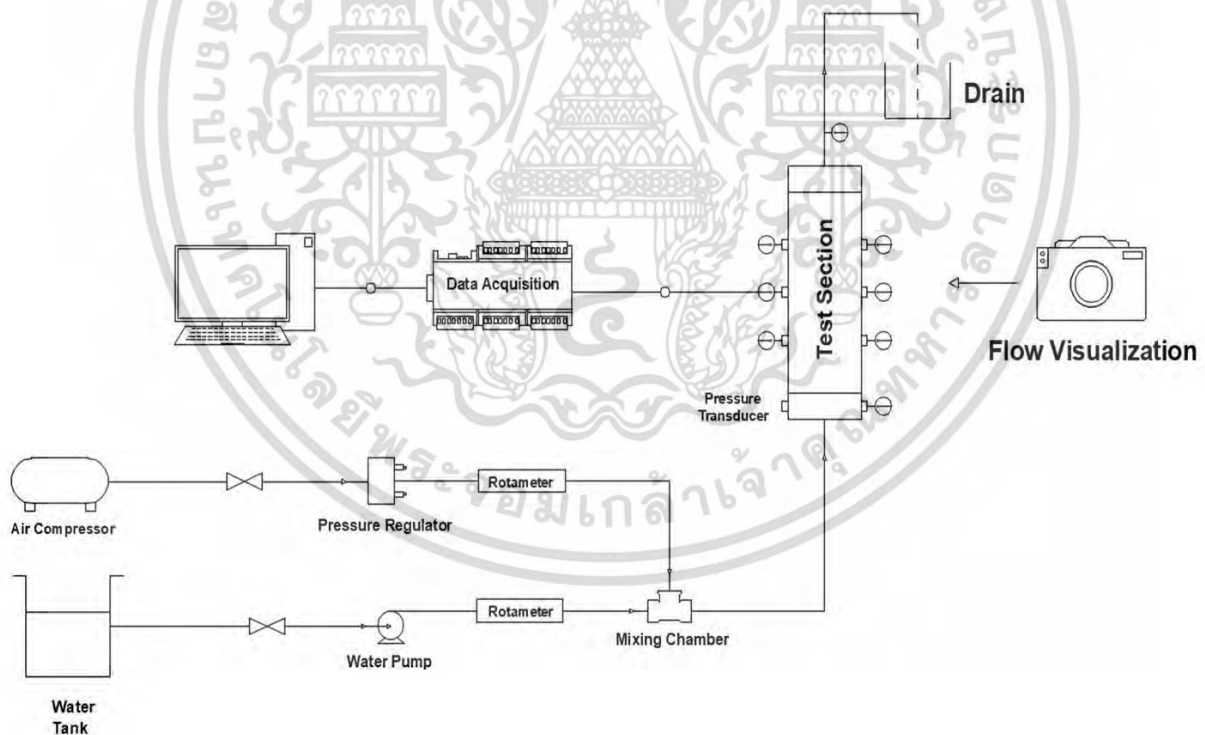
รูปที่ 3.1 พารามิเตอร์ด้านบนท่อไมโครของ 1 ลูกคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 พารามิเตอร์ด้านหน้าท่อไมโคร

### 3.1.2 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง



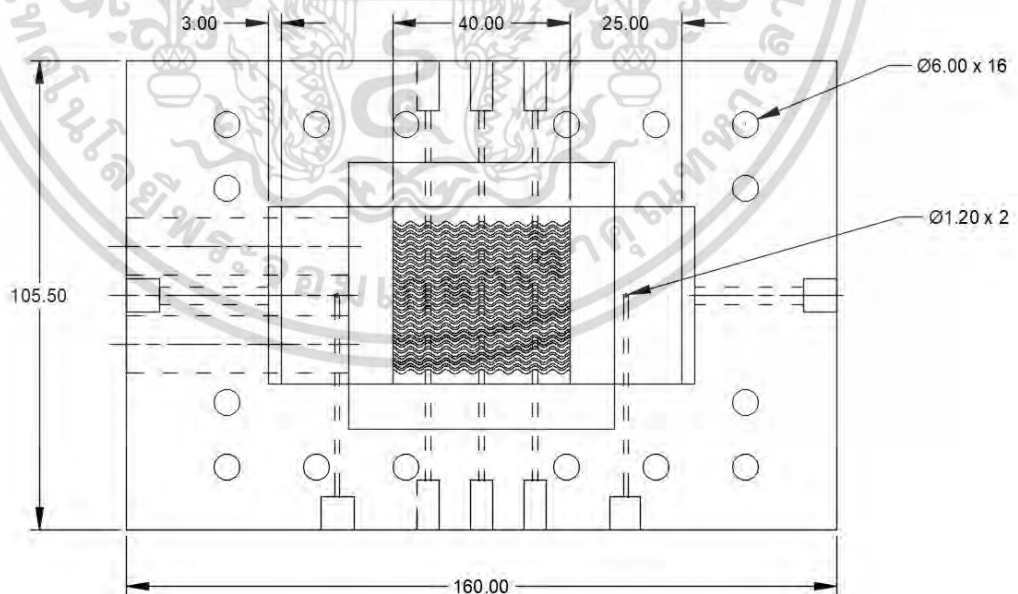
รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 แสดงวงจรการทำงานของชุดทดลอง ซึ่งเริ่มจากปั้มน้ำขนาด 18 W สูบน้ำดีไอหรือน้ำปราศจากไอออน จากแท่งน้ำอะคริลิคผ่านโรตاميเตอร์ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของของไหลได้ และมีปั้ลม ผ่านตัวควบคุมความดันซึ่งมีหน้าที่ควบคุมให้การไหลของอากาศให้คงที่ผ่านโรตاميเตอร์จากนั้นน้ำจะไปผสมกับอากาศที่ mixing chamber เป็นแบบตัวที ก่อนที่จะไหลเข้าช่องท่อไมโครโดยบริเวณช่องท่อไมโครจะมีเทอร์โมคอปเปิลคอยวัดอุณหภูมิของของไหลทั้งขาเข้าและขาออกรวมถึงวัดอุณหภูมิผนังท่อทองแดงบริเวณตรงกลางของชั้นทองแดง 6 ตำแหน่ง และมีตัวแปลงสัญญาณแรงดันคอยวัดความดันที่ขาเข้า โดยภายในท่อไมโครทองแดงจะมีฮีตเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคอยให้ความร้อนกับทองแดง หลังจากที่ของไหลไหลออกจากท่อไมโครแล้ว ข้อมูลในส่วนของอุณหภูมิทั้ง 8 ตำแหน่งจะถูกส่งผ่านมายัง data logger และถูกแสดงมายังคอมพิวเตอร์ น้ำที่ไหลออกมาจากชุดทดลองแล้วจะถูกนำไปลดอุณหภูมิเพื่อนำมาใช้ในการทดลองครั้งต่อไป ในส่วนของรูปแบบการไหลต่าง ๆ ของการไหลสองสถานะจะถูกบันทึกด้วยกล้อง Mirrorless ใช้เลนส์ Tokina 100 มม. F2.8 macro ด้วยความเร็วชัตเตอร์ 1/8000 โดยใช้แฟลช Godox V1

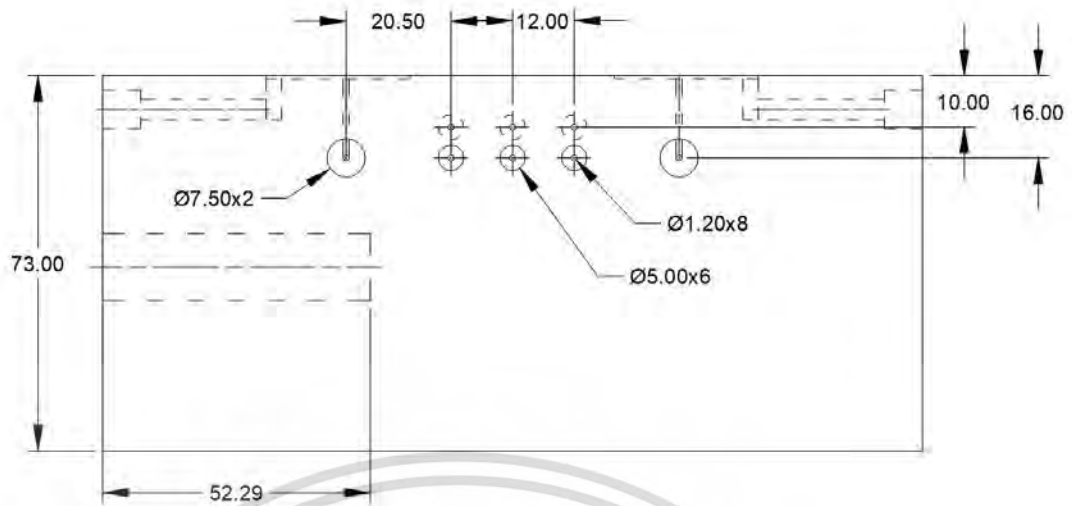
### 3.1.3 รายละเอียดของชุดทดลอง

ชุดทดลองจะมีในส่วนของท่อไมโครทองแดงและในส่วนของอีพอกซีเรซิน โดยฉนวนอีพอกซีเรซินจะมีการเจาะรูไว้เพื่อใช้ในส่วนของทางการไหลของของไหล และสำหรับการวัดอุณหภูมิผนังท่อทองแดง รวมไปถึงในส่วนของกรวัดความดัน

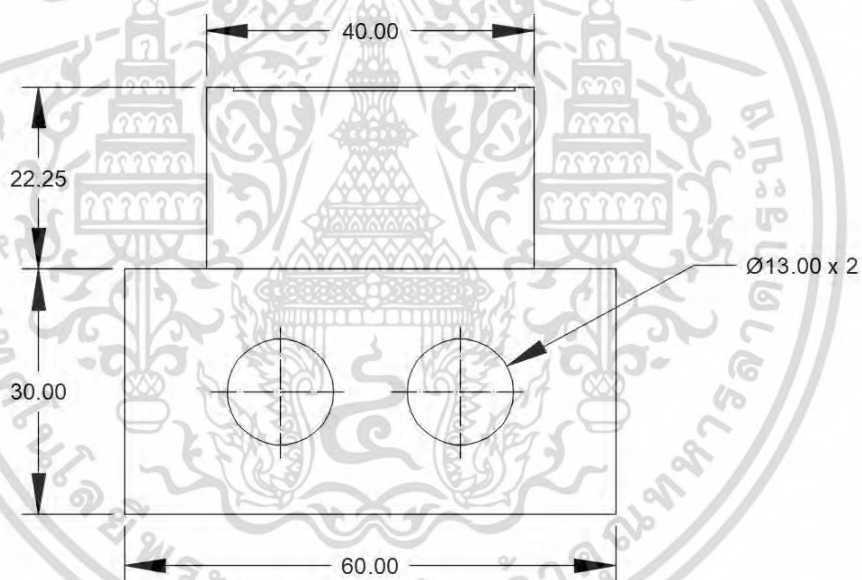


รูปที่ 3.4 ภาพฉายด้านบนของฉนวนเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ภาพฉายด้านข้างของฉนวนเรซิน



รูปที่ 3.6 ภาพฉายด้านหน้าของทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการศึกษาส่วนประกอบชุดทดลองและซ่อมบำรุง

#### 3.2.1 การซ่อมบำรุง

ทำการทำแท่งน้ำอะคริลิกชิ้นใหม่เพื่อให้สามารถเห็นระดับน้ำได้ชัดเจนมากขึ้นโดยการตัดและเจาะอะคริลิกจากงานที่เหลือ รวมถึงอัดซิลิโคนและต่อข้อต่อวาล์วทองแดงเพื่อให้น้ำไหลออก



รูปที่ 3.7 การตัดชิ้นงานอะคริลิก



รูปที่ 3.8 การอัดซิลิโคนและต่อข้อต่อวาล์วทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการขัดท่อทองแดงด้วยผลิตภัณฑ์ขัดโลหะที่ใช้ในการทำทำความสะอาดและเปลี่ยนแผ่นยาง เพื่อให้เห็นรูปแบบการไหลแบบสองสถานะได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

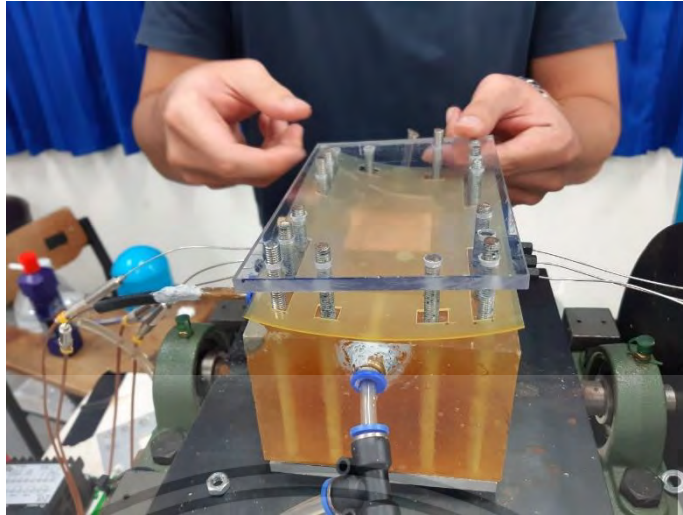


รูปที่ 3.9 แสดงพื้นผิวทองแดงก่อนขัดและหลังขัด



รูปที่ 3.10 การขัดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงการเปลี่ยนแผ่นยางใต้แผ่นโพลีคาร์บอเนต

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมี ดังนี้

1. ถังเก็บน้ำอะคริลิก ทำหน้าที่เก็บน้ำเพื่อเตรียมจ่ายเข้าอุปกรณ์ทดลอง



รูปที่ 3.12 ถังอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือปั๊มหอยโข่ง ขนาด 18 W เฮดปั๊ม 5 เมตรน้ำ ทำหน้าที่ดูดน้ำจากถังเก็บน้ำโดยใช้แรงเหวี่ยงไปผลักดันของเหลวรอบ ๆ ให้ไหลตามแนวเส้นรอบวงของตัวเรือนปั๊ม ทำให้สามารถจ่ายน้ำไปยังชุดทดลองได้



รูปที่ 3.13 ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

3. ปั๊มลมหรือเครื่องอัดอากาศ ทำหน้าที่ในการอัดลมให้มีแรงดันสูงเพื่อส่งผ่านลมจากปั๊มเข้าสู่ชุดทดลอง ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ตัวปั๊มลม และตัวเก็บลม โดยปั๊มลมจะดูดลมเก็บไว้ในถังเป็นช่วงเวลาสั้นๆ และถึงลมจะทำหน้าที่จ่ายลมออก



รูปที่ 3.14 เครื่องอัดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตัวควบคุมความดัน โดยปกติความดันลมที่ออกจากถังเก็บลมอาจจะมากกว่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นเราจึงต้องติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความดันให้รักษาสภาพคงที่ตลอดการใช้งาน



รูปที่ 3.15 ตัวควบคุมความดัน

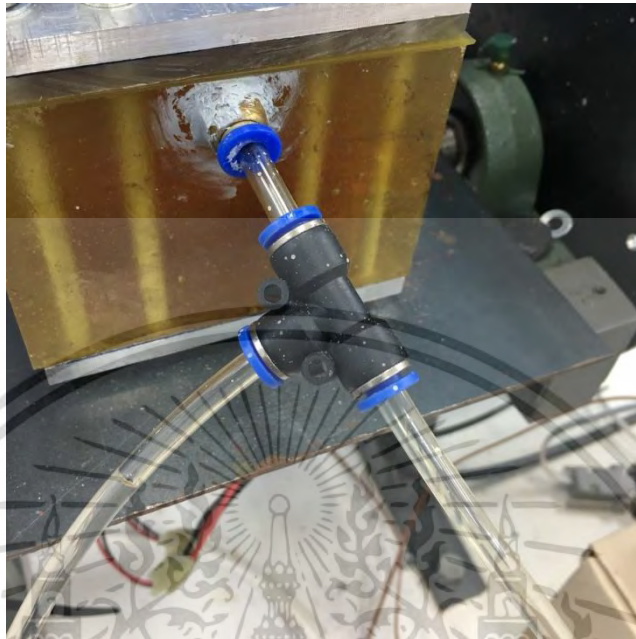
5. โรตاميเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับค่าอัตราการไหลของน้ำและอากาศ ภายในจะมี ลูกกลิ้งที่เคลื่อนที่ขึ้นลงตามค่าที่ปรับ โดยความละเอียดของโรตاميเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่เรา ทำ



รูปที่ 3.16 โรตاميเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อุปกรณ์ผสม ทำหน้าที่ผสมน้ำกับอากาศเข้าด้วยกันก่อนที่ของไหลจะไหลเข้าสู่ชุดทดลอง โดยเราจะเลือกใช้แบบตัวที่



รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ผสม

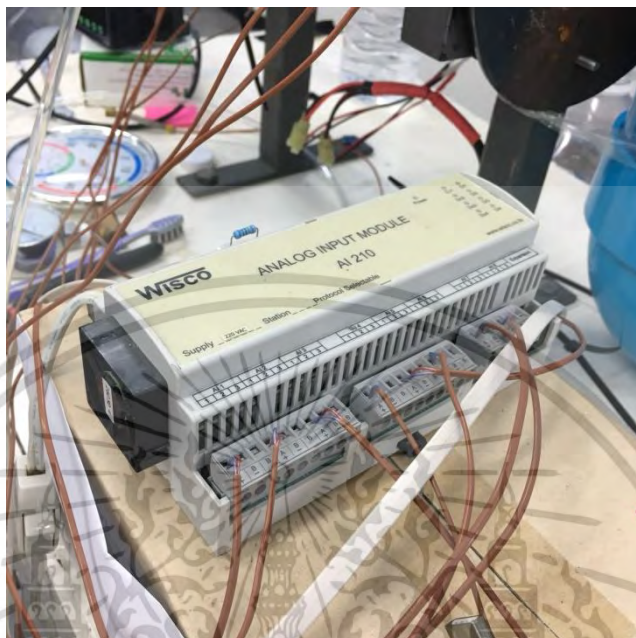
7. ตัวแปลงสัญญาณแรงดัน เราจะติดตั้งไว้ตรงขาเข้าของน้ำก่อนเข้าสู่ท่อไมโครทำหน้าที่วัดแรงดันจากตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบและเปลี่ยนค่าแรงดันที่วัดเป็นสัญญาณที่สามารถอ่านค่าได้ด้วยเครื่องมือวัดเป็นตัวเลขผ่านหน้าจอแสดงผลแบบดิจิทัล



รูปที่ 3.18 ตัวแปลงสัญญาณแรงดันและแสดงผลแบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องบันทึกข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าและบันทึกข้อมูลในรูปสัญญาณชนิดต่าง ๆ โดยมี sensor รับค่าในรูป analog ส่งผ่านเครื่องแปลงสัญญาณให้กลายเป็น digital และถูกนำไปเก็บใน memory เพื่อนำค่าไปแสดงผลบนหน้าจอกอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.19 เครื่องบันทึกข้อมูล

9. มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฮีตเตอร์รวมถึงกระแสไฟฟ้า โดยการนำไปคล้องกับสายไฟและจิ้มตามจุดที่เราต้องการวัดค่าไฟ



รูปที่ 3.20 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เทอร์โมคัปเปิล ในการทดลองนี้เราเลือกใช้ชนิด T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ใช้วัดอุณหภูมิในแต่ละจุดในชุดทดลอง (8 จุด) มีหลักการทำงานโดยเปลี่ยนความร้อนให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากโลหะตัวนำ 2 ชนิดที่ต่างกันทางโครงสร้างอะตอมมาเชื่อมปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน เทอร์โมคัปเปิลมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับช่วงการวัดที่ต้องการ



รูปที่ 3.21 เทอร์โมคัปเปิล

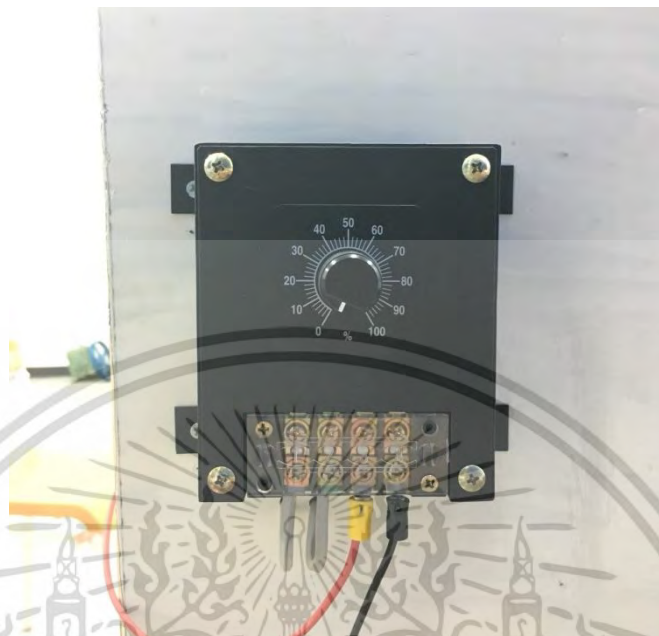
11. ฮีตเตอร์แบบแท่ง ขนาด 150 W สองตัวทำงานโดยให้ความร้อนแก่ระบบ โดยจะถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 3.22 ฮีตเตอร์แบบแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแท่งฮีตเตอร์เพื่อให้ความร้อนให้กับระบบ



รูปที่ 3.23 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

13. กล้อง Mirrorless เลนส์ Tokina 100 มม. F2.8 Macro ความเร็วชัตเตอร์ 1:8000 โดย  
ใช้แฟลช Godox V1 ในการถ่ายภาพรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ



รูปที่ 3.24 กล้อง Mirrorless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ค่าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแต่ละค่าที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสตรง อัตราการไหลเชิงปริมาตรและค่าตัวเลขเรย์โนลในการไหลตามผิวของแต่ละของไหล โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรสามารถถูกปรับได้จากโรตاميเตอร์ และค่าของอัตราการการให้พลังงานความร้อนสามารถปรับได้จากตัวฮีตเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 3.1 ค่าที่ใช้ในการทดลองของไหลสองสถานะในท่อคลื่น

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ทดลอง
$\dot{Q}_{heater}$ (W)	55
อัตราการไหลของน้ำ (cm <sup>3</sup> /min)	100, 150, 200, 250, 300, 350, 400
อัตราการไหลของอากาศ (L/min)	0.5, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50
$Re_{SL}$	144, 207, 270, 319, 394, 439, 511
$Re_{SG}$	30, 46, 62, 76, 92

### 3.5 ขั้นตอนในการทดลอง

1. ตรวจสอบระดับน้ำดีไอในแท่งค้ำน้ำอะคริลิกเพื่อเตรียมความพร้อมก่อนเปิดเครื่องใช้งาน
2. เตรียมอุปกรณ์ให้พร้อมใช้งานโดยการเปิดปั้มน้ำ ปั้ลม เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บข้อมูล แผงหน้าจอดีจิตอล
3. เชื่อมต่อเครื่องบันทึกผลกับคอมพิวเตอร์ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับเก็บผลการทดลอง
4. ปรับอัตราการไหลของน้ำและอากาศรวมถึงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ฮีตเตอร์ ตามตารางการทดลอง จากนั้นรอให้ค่าที่แสดงผลเข้าสู่ช่วงสภาวะคงที่
5. ดูแนวโน้มอุณหภูมิที่แสดงผลจากซอฟต์แวร์
6. วัดค่าพลังค์ความร้อนทุก 5 นาที พร้อมกับตรวจสอบระดับน้ำในแท่งค้ำ
7. ทำการบันทึกผลเป็นระยะเวลา 10 นาที และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อนำค่าอุณหภูมิและความดันลดที่ได้มาเฉลี่ย
8. ทำการถ่ายรูปแบบการไหลหลังจากการเก็บค่าแต่ละเงื่อนไข
9. ทำการทดลองตามตารางการทดลองจนครบทุกค่าจากนั้นเปลี่ยนทิศทางชุดทดลองเป็นแนวตั้งแบบไหลขึ้นและไหลลง แล้วทำการทดลองซ้ำ (ตั้งแต่ข้อ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ (อากาศ-น้ำ) ในท่อคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาดเล็กกว้างตัวในแนวนอนและแนวตั้ง โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำทั้งหมด 7 ค่า ที่ 100, 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 cc/min และทำการเติมอากาศที่มีอัตราการไหล 5 ค่า ตั้งแต่ 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 LPM โดยในการทดลองครั้งนี้ จะใช้พลังความร้อนที่พื้นผิวคงที่ตามแนวแกน 55 W และทำการเปรียบเทียบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและความดันลดภายในท่อเปรียบเทียบการไหลสองสถานะในท่อไมโครแบบคลื่นที่มีการจัดวางท่อระหว่างแนวนอนและแนวตั้ง

#### 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง

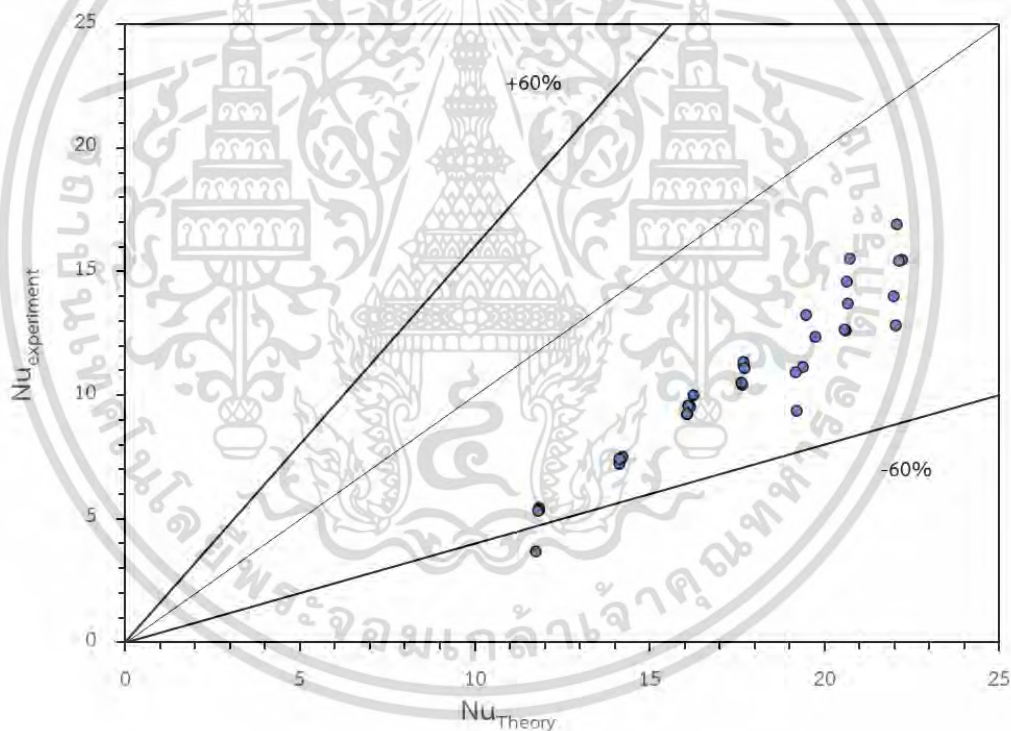
การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง ทำเพื่อทดสอบความถูกต้องของชุดทดลองว่ามีค่าคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขนี้สเชิลท์ว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใด ซึ่งในการศึกษานี้จะแบ่งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลองออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวนอน และการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้ง

##### 4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวนอน

การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะในท่อคลื่น สามารถใช้สมการทำนายค่าตัวเลขนี้สเชิลท์จากสมการสหสัมพันธ์ของ Kalb and Sheader (1983) จากการทดลอง ในขั้นแรกได้ทำการคำนวณค่าตัวเลขดิน โดยใช้เลขเรย์โนลด์สองสถานะตามที่คำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำและอากาศ พบว่าสามารถคำนวณค่าตัวเลขดิน ได้ในช่วงระหว่าง 112.69 – 407.32 และทำการคำนวณค่าตัวเลขพรีนเทิลด์สองสถานะออกมาได้ในช่วง 4.62 – 5.14 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขของสมการสหสัมพันธ์ที่นำมาใช้ ทำการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างค่าตัวเลขนี้สเชิลท์ที่ได้จากการทดลองกับค่าตัวเลขนี้สเชิลท์ที่ได้จากการคำนวณจากสมการสหสัมพันธ์ที่พัฒนาโดย Kalb and Sheader (1983) ดังรูป 4.1 พบว่าในการไหลสองสถานะ อากาศ – น้ำ มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 76.4% โดยคาดว่าความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลองมีหลายปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือ อัตราการไหลของน้ำมีค่าไม่คงที่ตลอดช่วงการทดลอง เนื่องจากโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามิเตอร์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ ถูกใช้งานมาอย่างยาวนาน ทำให้เกิดการความคาดเคลื่อนของอัตราการไหลที่ค่อนข้างสูง ปัจจัยต่อมาคือ ความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล เนื่องจากที่ผ่านมามีการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลอย่างยาวนานโดยยังไม่มีกรรมนำมาสอบเทียบและมีการถอดชุดทดลองออกมาซ่อมบำรุง จึงทำให้บริเวณส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลที่ถูกติดตั้งไว้ด้านข้างของท่อไมโคร ซึ่งมีความไวต่อการรับค่าค่อนข้างมาก เกิดการเคลื่อนตำแหน่งตำแหน่งเกิดขึ้น ทำให้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ เกิดความคลาดเคลื่อน ปัจจัยสุดท้ายคือ แหล่งจ่ายความร้อนจ่ายไม่คงที่ เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ปรับจากไฟฟ้ากระแสสลับมาเป็นกระแสตรง ซึ่งก่อนปรับค่ากระแสและความต่างศักย์มีค่าไม่นิ่งตามการใช้ไฟฟ้าของอาคาร จึงเป็นผลให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ฮีตเตอร์แบบแท่งไม่คงที่ ทำให้ฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายเข้าสู่ชุดทดลองมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาทั้งหมด ส่งผลให้ค่าตัวเลขนี้สเกลล์จากการทดลองมีผลที่คลาดเคลื่อนจากที่คำนวณจากทฤษฎีอย่างมาก

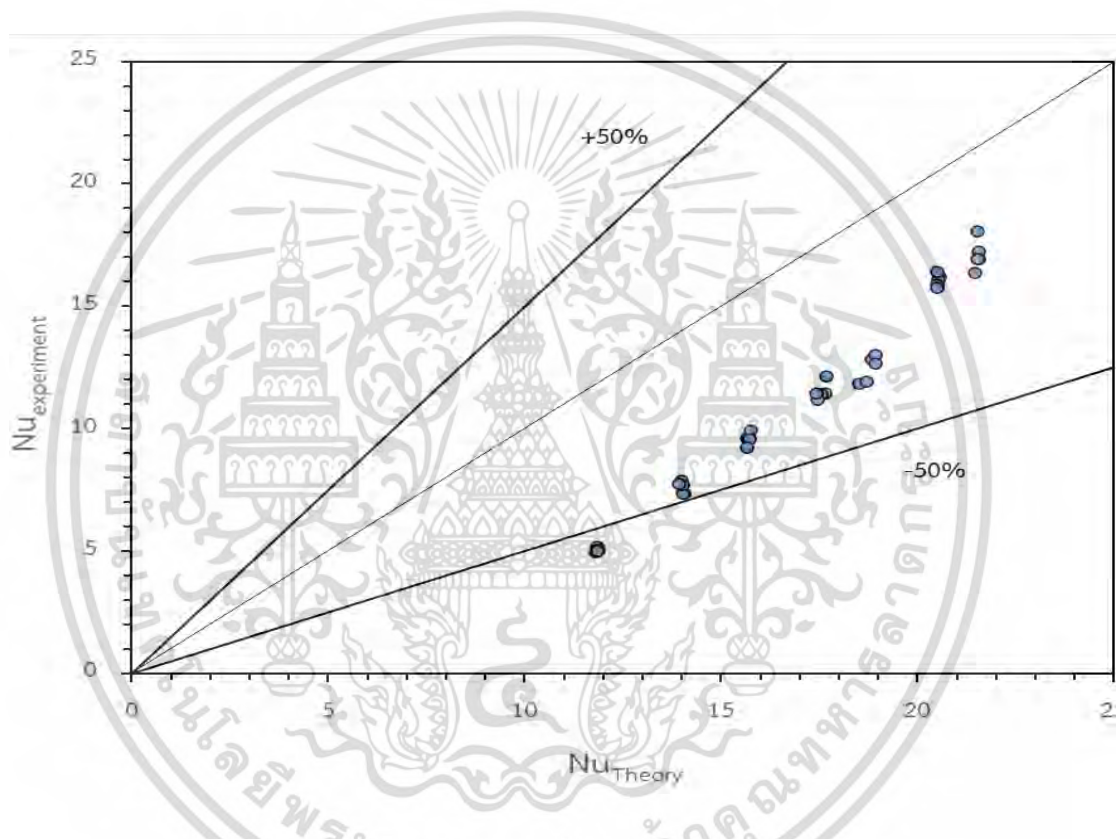


**รูปที่ 4.1** กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนี้สเกลล์สำหรับการไหลแบบสองสถานะในแนวนอน ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb and Sheader (1983)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

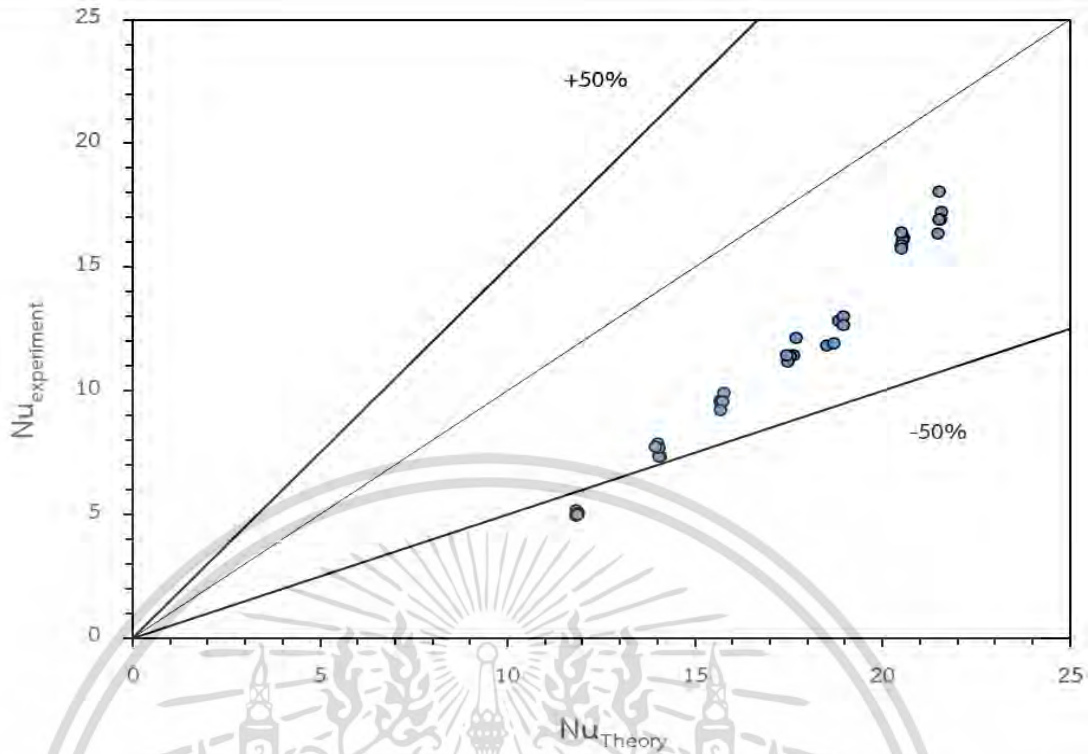
#### 4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้ง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งสามารถแสดงออกมาเป็น 2 ส่วนคือ แบบแนวตั้งที่มีการไหลขึ้นและแบบแนวตั้งที่มีการไหลลง ซึ่งสมการที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขสเคลิล์ของการไหลในแนวตั้งจะใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb and Sheader (1983) เช่นเดียวกันกับที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะที่มีการวางตัวในแนวนอน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสเคลิล์สำหรับการไหลแบบสองสถานะในแนวตั้งแบบไหลลง ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb and Sheader (1983)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลท์สำหรับการไหลแบบสองสถานะในแนวตั้งแบบไหลขึ้น ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb and Sheader (1983)

จากการทดลอง ในขั้นแรกได้ทำการคำนวณค่าตัวเลขดินโดยใช้เลขเรย์โนลด์สองสถานะตามที่คำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำและอากาศ พบว่าสามารถคำนวณค่าตัวเลขดิน ได้ในช่วงระหว่าง 114.45-382.13 สำหรับกรณีไหลลงและ 110.75-400.33 สำหรับกรณีไหลขึ้น ทำการคำนวณค่าตัวเลขพรีนเทิลด์สองสถานะออกมาได้ในช่วง 4.62 – 5.14 ซึ่งตรงตามเงื่อนไขของสมการสหสัมพันธ์ที่นำมาใช้ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทดลองกับค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการคำนวณจากสมการสหสัมพันธ์ที่พัฒนาโดย Kalb and Sheader (1983) ดังรูป 4.2 และ 4.3 พบว่า ในการไหลสองสถานะที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลงและในแนวตั้งแบบไหลลง มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 36.08% และ 33.79% ตามลำดับ โดยคาดว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากอัตราการไหลของน้ำที่วัดจากโรตاميเตอร์ มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากผ่านอายุการใช้งานมาก ส่งผลให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะมีผลที่คลาดเคลื่อนไปพอสมควร ปัจจัยต่อมา คือความคลาดเคลื่อนของการวัดอุณหภูมิจาก เทอร์โมคัปเปิลที่วัดความต่างของอุณหภูมิในแต่ละจุดรอบ ๆ ชุดทดลอง ซึ่งส่งผลให้ ค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่คำนวณออกมาได้มีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ปัจจัยถัดมา คือระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองมีความ

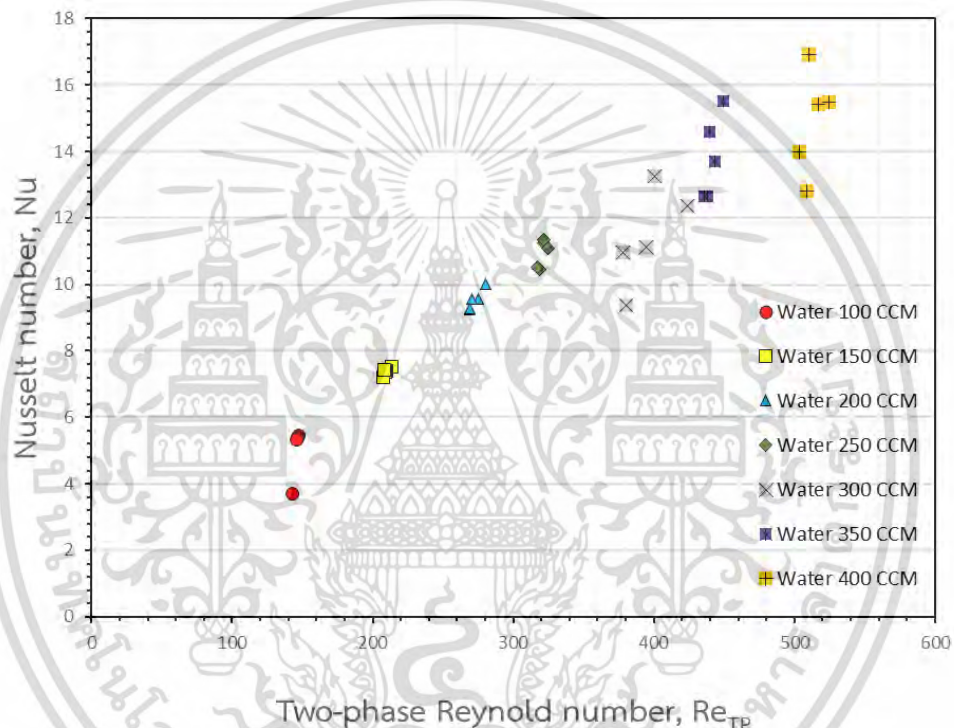
กระชั้นชิดมากเกินไป ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ทดลองในแต่ละอัตราการไหลของน้ำและอากาศมีน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าไม่ถูกต้องใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินไป รวมไปถึงการที่ต้องลดจำนวนครั้งที่ต้องเก็บผลการทดลองซ้ำ ส่งผลให้ในการทดลองแต่ละครั้ง ค่าอุณหภูมิที่บันทึกได้มักจะเป็นค่าที่ตอนนั้นยังไม่มีเสถียรภาพพอ ซึ่งตามปกติแล้วเวลาบันทึกผลการทดลองในแต่ละเงื่อนไข จำเป็นต้องรอให้เข้าสู่สภาวะเสถียรก่อนจึงค่อยบันทึกผลอุณหภูมิในแต่ละจุดได้ เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่ยังไม่เสถียรมาคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะและค่าตัวเลขนัสเซิลท์ จะส่งผลให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนพอสมควร ปัจจัยสุดท้าย ก็คือเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองนี้อาจจะแตกต่างกับเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองของ Kalb and Sheader (1983) เช่น วัสดุที่ใช้ในการทดลองอาจจะมีแตกต่างจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองต้นแบบ โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตชุดท่ออาจจะไม่ใช่ทองแดงที่เป็นวัสดุที่ใช้ในการสร้างท่อไมโครแชนแนลของผู้ทดลอง ซึ่งวัสดุที่แตกต่างกันจะส่งผลถึงการนำความร้อนของท่อไปสู่ของไหลที่ใช้ในการทดลอง รวมไปถึงลักษณะของท่อที่ใช้ในการทดลองต้นแบบอาจจะมีขนาดแตกต่างกัน โดยในการทดลองของ Kalb and Sheader (1983) ได้ใช้ท่อโค้งที่มีหน้าตัดเป็นแบบวงกลม ที่มีรัศมีความโค้งแปรผันไปตั้งแต่ 10 mm ถึง 100 mm และเนื่องด้วยปัญหาการเข้าถึงงานวิจัยของของการทดลอง Kalb and Sheader ไม่สามารถดูงานวิจัยนี้แบบทั้งเล่มได้ ทำให้ทางผู้ทดลองไม่แน่ใจถึงขนาดท่อที่ใช้ว่าจะใกล้เคียงกับขนาดไมโครแชนแนลของผู้ทดลองหรือไม่ และเงื่อนไขของการจัดวางท่ออาจจะไม่ได้จัดวางในแนวตั้งเหมือนกับที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ อาจจะเป็นปัจจัยส่งผลให้สมการสหสัมพันธ์ที่นำมาใช้ให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่คลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองเป็นอย่างมาก

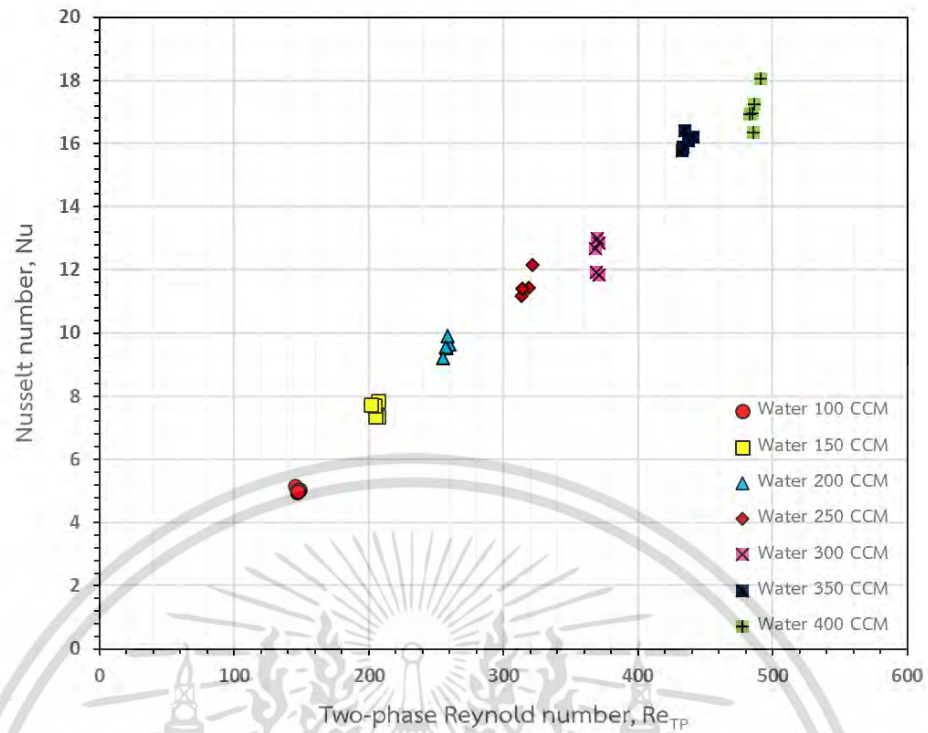
## 4.2 การถ่ายเทความร้อน

### 4.2.1 การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ

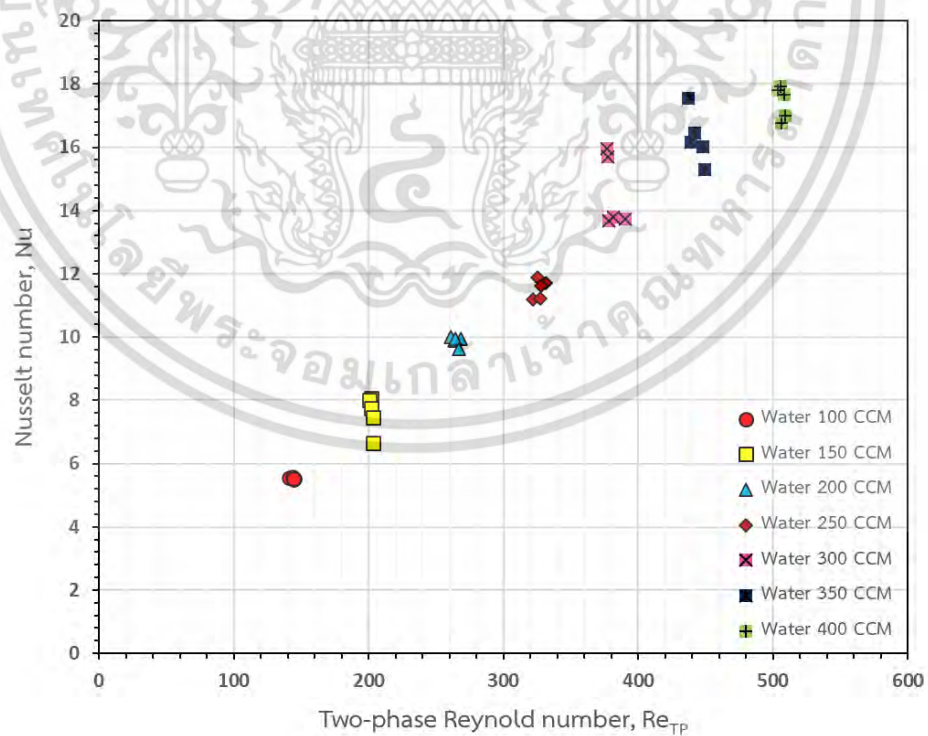
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลอง เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนโดยแสดงค่าเป็นตัวแปรของตัวเลขนัสเซิลท์ของการไหลสองสถานะในท่อไมโครหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบคลื่นโดยมีโดยมีแนวทางการไหลในแต่ละแนวซึ่งมีการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ 2.15-2.19 โดยเริ่มทำการทดลองวางแนวทางการไหลในแนวนอนและกำหนดอัตราการไหลน้ำและลมเป็นไปตามตารางที่ 3.1 ได้ผลลัพธ์ดังนี้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวนอน

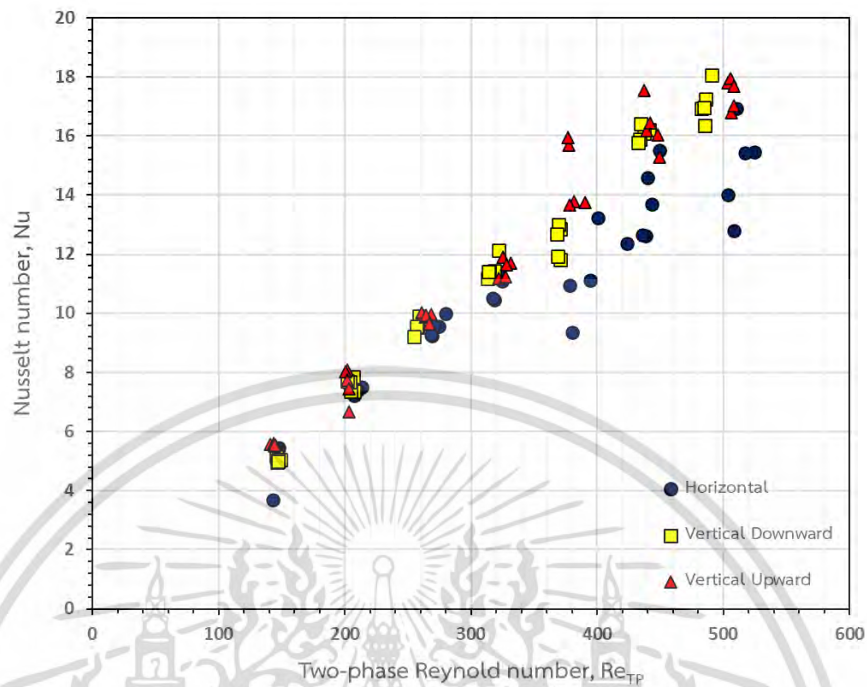


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวตั้งไหลลง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวตั้งไหลขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



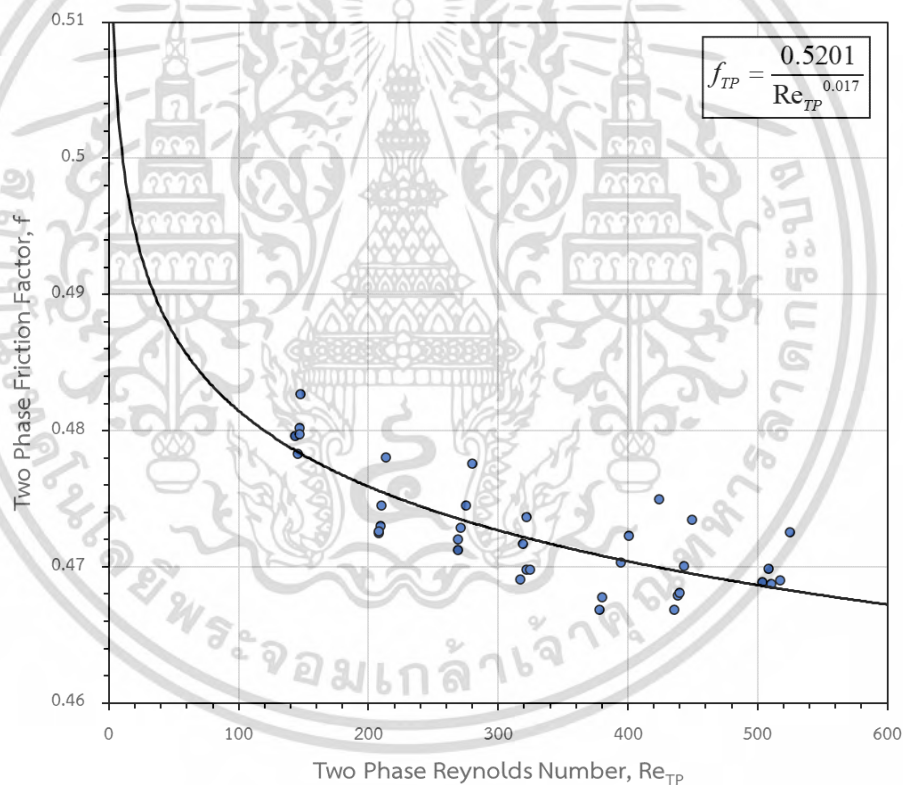
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่น โดยมีแนวทางการไหลในแต่ละแนว

จากรูปที่ 4.4 - 4.6 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่น โดยมีแนวทางการไหลแบบแนวนอน แบบแนวตั้งไหลขึ้น และแบบแนวตั้งไหลลง ตามลำดับ โดยแสดงเป็นตัวเลขเรย์โนลสองสถานะและตัวเลขนัสเซลท์ พบว่าทั้งสามกรณีมีตัวเลขนัสเซลท์แปรผันตามเลขเรย์โนลสองสถานะ หากพิจารณาในแนวทางการไหลแบบเดียวกัน ที่สภาวะอัตราการไหลของน้ำเดียวกันจะเห็นว่าค่าเลขนัสเซลท์หรือการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นโดยที่มีเลขเรย์โนลสองสถานะใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่น โดยมีแนวทางการไหลแต่ละแนว จากผลการทดลองเห็นได้ว่ากรณีอัตราการไหลของน้ำตั้งแต่ 100 CCM ถึง 250 CCM ได้ค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่กรณีอัตราการไหลของน้ำ 300 ถึง 400 CCM พบว่าค่าตัวเลขนัสเซลท์กระจายแตกต่างกัน โดยที่แนวทางการไหลแบบแนวตั้งไหลขึ้นมีค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าแนวที่เหลือเป็นส่วนมาก เมื่อพิจารณาในสภาวะอัตราการไหลของน้ำเดียวกัน

### 4.3 ความดันลด

#### 4.3.1 สัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลแบบสองสถานะที่มีแนวทางการไหลแบบแนวนอน

ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทาน มีแฟคเตอร์ทั่วไปขึ้นอยู่กับค่าเรโนลด์ของการไหลในท่อ สำหรับการไหลแบบราบเรียบนั้น ค่าของเรโนลด์นัมเบอร์จะอยู่ที่  $Re < 2300$  และค่าของสัมประสิทธิ์การเสียดทานในท่อ  $f$  คือ  $f = \frac{64}{Re}$  (สำหรับท่อกลม) แต่ในที่นี้ท่อของเราเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานในท่อจึงเป็น  $f = \frac{k}{Re}$  ( $48 < k < 96$ ) โดย  $k$  คือแฟคเตอร์รูปร่าง ในที่นี้ท่อของเราเป็นท่อโค้งคลื่นรูปโคไซน์หน้าตัดสี่เหลี่ยม เราจึงทำการหาค่า  $k$  ได้จากสมการความดันลดในรูปแบบการไหลสองสถานะ (2.23) ซึ่งจากสูตรนี้เราสามารถหาพจน์ของความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานและนำมาแทนค่าหา  $k$  ได้ในที่สุด



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวนอน

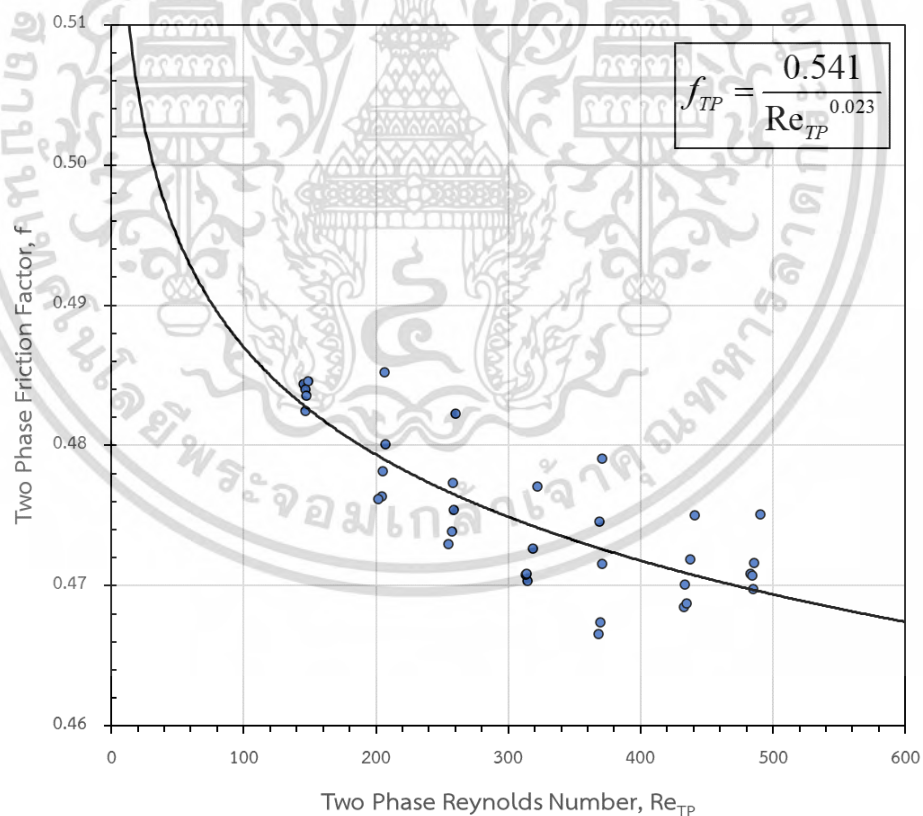
จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่าของเลขเรย์โนลด์จะส่งผลให้ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลง ซึ่งสามารถประมาณการลดลงนี้ด้วยสมการยกกำลังที่เราหาค่าจากการทดลองมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับเลขเรย์โนลของท่อไมโครคังคสันโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวนอนได้สมการความสัมพันธ์ออกมาดังรูป

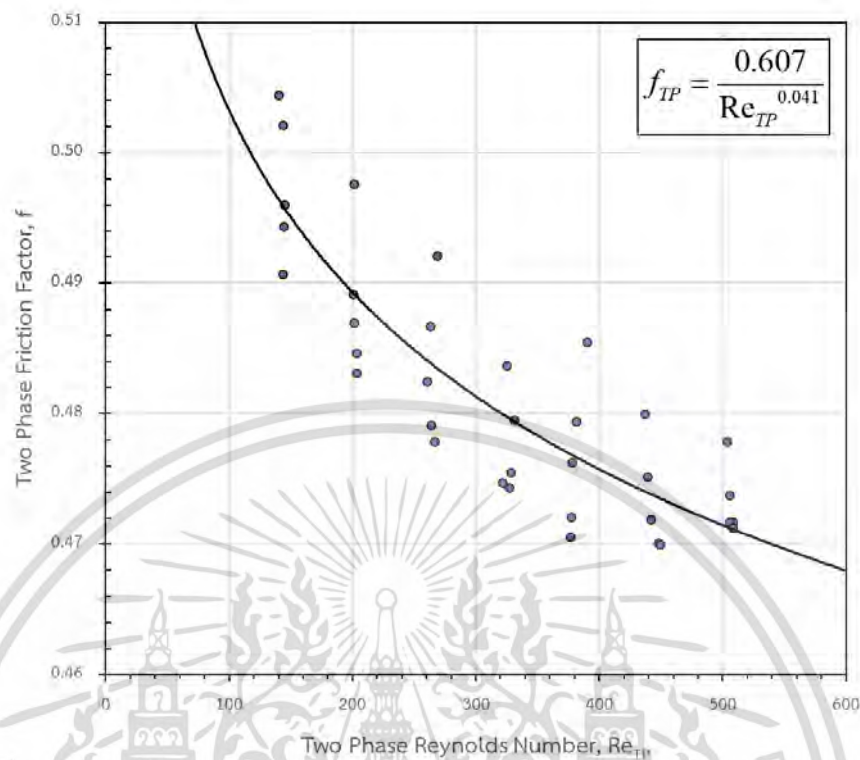
#### 4.3.2 สัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลแบบสองสถานะที่มีแนวทางการไหลแบบแนวตั้ง

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลในแนวตั้งทั้งแบบไหลลงและแบบไหลขึ้น สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการหาสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลในแบบแนวนอน เพียงแต่ว่าเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของสมการความดันตกคร่อมทั้งหมดของการไหลแบบสองสถานะ (2.23) ในการไหลแบบแนวตั้งนั้นจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงด้วย ต่างจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานการไหลในแนวนอนที่ไม่ต้องพิจารณาองค์ประกอบเนื่องจากความโน้มถ่วง ซึ่งเป็นเหตุให้ค่าความดันลดในหน่วยบาร์ที่วัดได้จากตัวแปลงสัญญาณแรงดันของการไหลในแบบแนวตั้งทั้งสองแบบ มีค่าสูงกว่าค่าความดันลดของการไหลในแบบแนวนอน



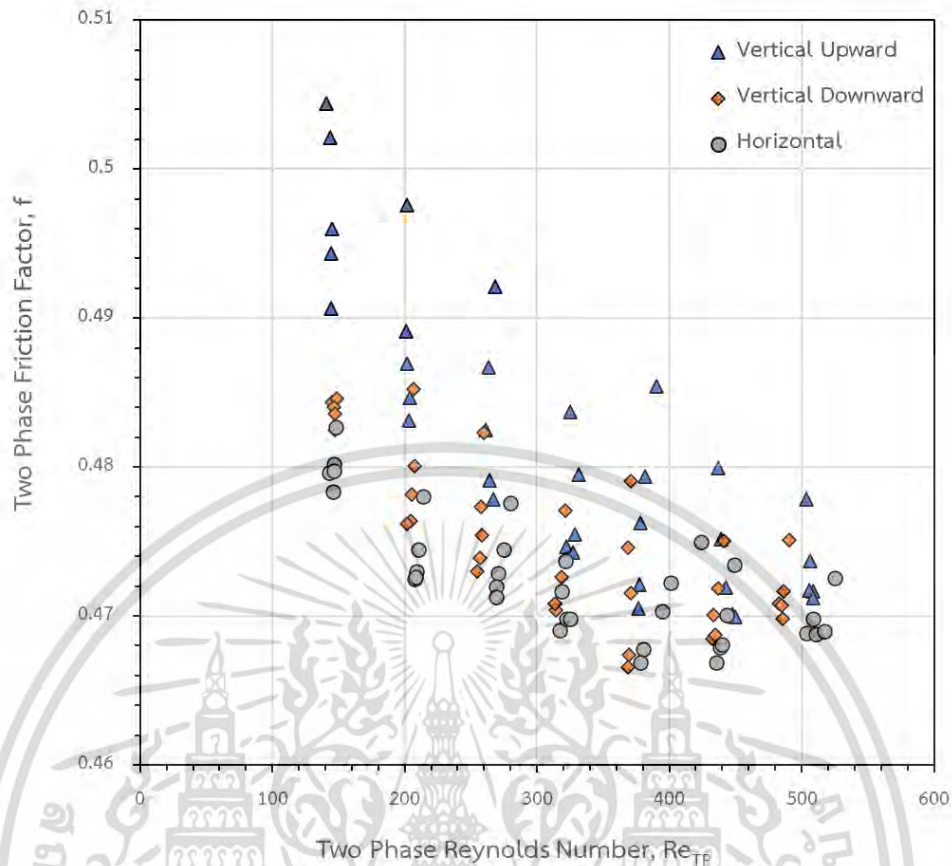
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับเลขเรย์โนลสำหรับการไหลแบบสองสถานะในท่อคัสสันโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวตั้งไหลลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานกับเลขเรย์โนลสำหรับการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลแบบแนวตั้งไหลขึ้น

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลสองสถานะในท่อคลื่นแบบแนวตั้งทั้งแบบไหลลงและแบบไหลขึ้น พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลสองสถานะมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การเสียดทานลดลง ซึ่งมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการไหลสองสถานะในท่อคลื่นแบบแนวนอน เมื่อทำการปรับเส้นโค้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลในแนวตั้งทั้งสองแบบมีการเข้าใกล้เส้นแนวโน้มได้ดีมากกว่าการไหลในแบบแนวนอน ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานที่มีการกระจายจากเส้นแนวโน้มมากกว่า



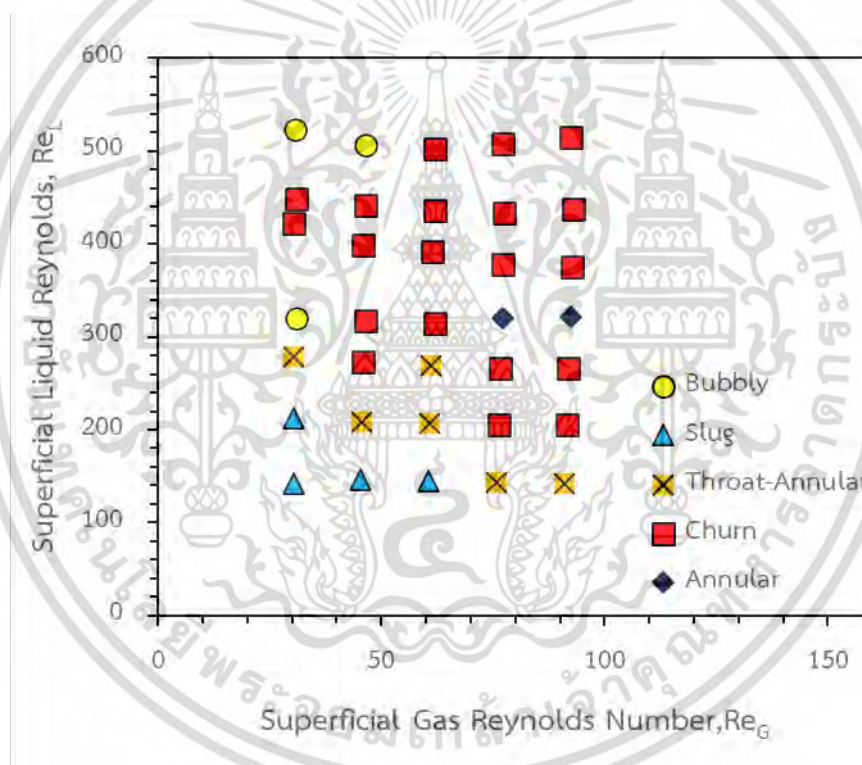
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลในแต่ละแนว

จากรูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานของการไหลแบบสองสถานะในท่อคลื่นโดยมีแนวทางการไหลในแต่ละแนว ต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์แบบสองสถานะทั้งหมด 35 กรณี พบว่า แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานในแนวตั้งแบบไหลขึ้นมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการไหลในแนวอื่นทุกกรณี โดยคาดว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลในแนวตั้งแบบไหลขึ้น มีทิศทางการไหลมีทิศสวนทางกับแรงโน้มถ่วง ทำให้ป้อนน้ำและป้อนลมจึงต้องสร้างกำลังงานที่มากขึ้นเพื่อให้มีแรงดันที่สามารถเอาชนะแรงโน้มถ่วงเพื่อป้อนขึ้นไปสู่ทางออกของท่อให้ได้ เป็นผลให้ความดันลดที่วัดได้จากตัวแปลงสัญญาณแรงดันมีค่ามากที่สุด ในบรรดา 3 แนวทั้งหมด

## 4.4 รูปแบบการไหล

### 4.4.1 รูปแบบการไหลในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวนอน

จากการทดลองพบว่า เกิดรูปแบบการไหลในท่อไมโครรูปคลื่นที่มีการวางตัวในแนวนอน ทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ การไหลแบบ bubbly, slug, throat-annular, churn และ annular ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.13–4.17 พบว่าจะเกิดการไหลแบบ slug ที่  $Re_L$  เท่ากับ 141 – 212 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 – 60 จะเกิดการไหลแบบ throat-Annular ที่  $Re_L$  เท่ากับ 142 – 278 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 – 90 จะเกิดการไหลแบบ bubbly ที่  $Re_L$  เท่ากับ 320 – 523 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 – 46 จะเกิดการไหลแบบ Churn flow ที่  $Re_L$  เท่ากับ 205 – 514 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 – 92 จะเกิดการไหลแบบ annular ที่  $Re_G$  เท่ากับ 319 – 322 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 77 – 92



รูปที่ 4.12 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะในท่อไมโครรูปคลื่น ที่วางตัวในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. Bubbly flow

รูปแบบการไหลแบบ bubbly จะเห็นได้ว่าช่วงที่เป็นฟองอากาศไหลแน่นเต็มช่อง สลับกับรูปแบบการไหลแบบ slug อันเนื่องมาจากการเป็นแยกตัวออกจากรูปแบบ slug flow อีกทั้งยังเป็นการไหลในท่อโค้งจึงเห็นการไหลเป็นกระแสปองน้ำได้อย่างชัดเจน

## 2. Slug flow

ฟองอากาศแนวยาวจะเห็นเป็นรูปร่างได้ดี และสลับกันกับฟองอากาศสั้นโดยคั่นด้วยพื้นที่ส่วนที่เป็นน้ำ หากเพิ่มอัตราการไหลของน้ำและอากาศให้มากขึ้น จะทำให้มีแนวโน้มที่รูปแบบการไหลเปลี่ยนเป็นแบบ throat-annular

## 3. Throat-Annular flow

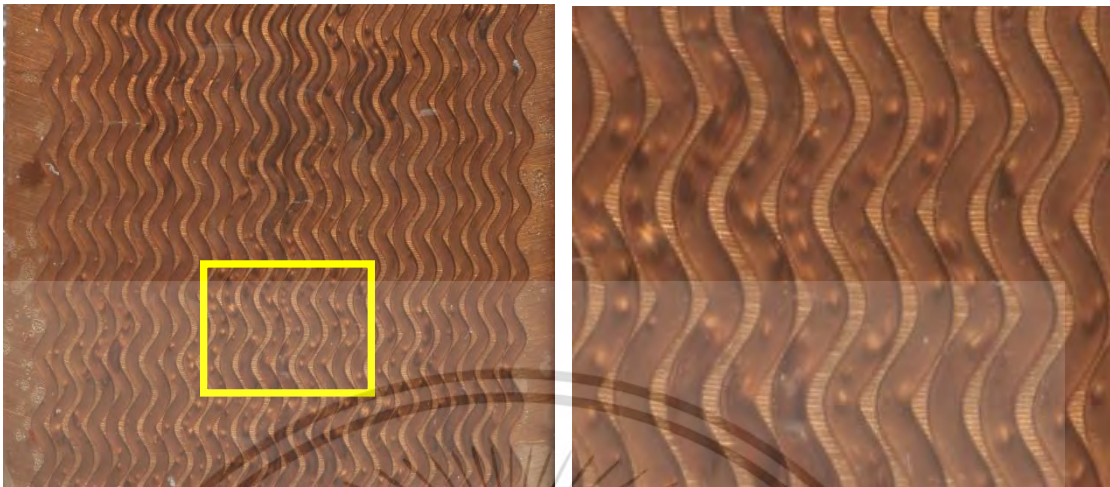
เกิดจากการเพิ่มอัตราการไหลทั้งน้ำและอากาศให้มากขึ้นจากรูปแบบการไหลแบบ slug ซึ่งจะมีแกนอากาศที่มีลักษณะเป็นคอคอดถูกบีบด้วยกระแสน้ำที่เป็นน้ำที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบโค้งในท่อ โดยจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นเนื่องจากทำให้เลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจากกราฟแสดงผลการทดลอง

## 4. Churn flow

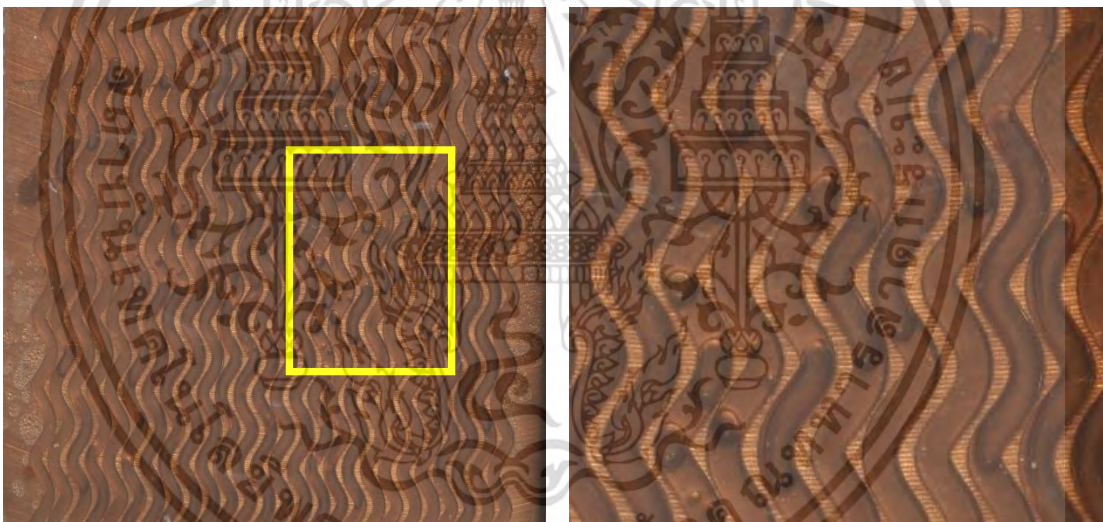
รูปแบบการไหลแบบ churn ในแนวนอนจากรูปจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงจาก throat-annular เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศให้มากขึ้นรวมทั้งการเคลื่อนที่ในท่อโค้งทำให้เกิดกระแสน้ำของอากาศ จึงทำให้น้ำกับอากาศผสมกันได้ดี ผลในรูปที่ได้จึงมีลักษณะน้ำขุ่นมัว

## 5. Annular

การไหลลักษณะนี้เป็นการไหลที่มีแกนอากาศเป็นแนวยาวอยู่ตรงกลางท่อและมีชั้นที่เป็นเฟสของน้ำกั้นไว้ระหว่างท่อกับชั้นที่เป็นแกนอากาศ จากกราฟแสดงรูปแบบการไหลแบบ annular จะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมากขึ้นจากรูปแบบการไหลแบบ churn ในอัตราการไหลของน้ำที่ 250 CCM แต่ทั้งนี้ก็เป็นเพราะอัตราการไหลของน้ำที่มากกว่านั้นไม่มีรูปแบบการไหลแบบ annular ก็เพราะการผิดพลาดของอุปกรณ์ถ่ายรูปรูปที่เกิดขึ้น ซึ่งจริง ๆ แล้วควรจะมี annular flow มากกว่านี้

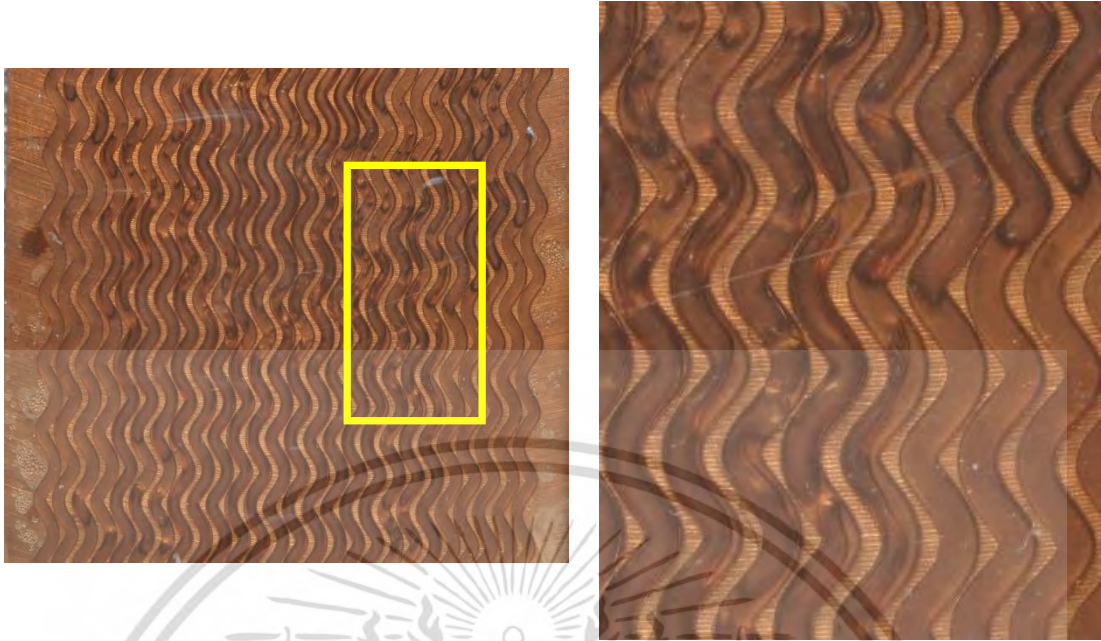


รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ bubbly ในแนวนอน

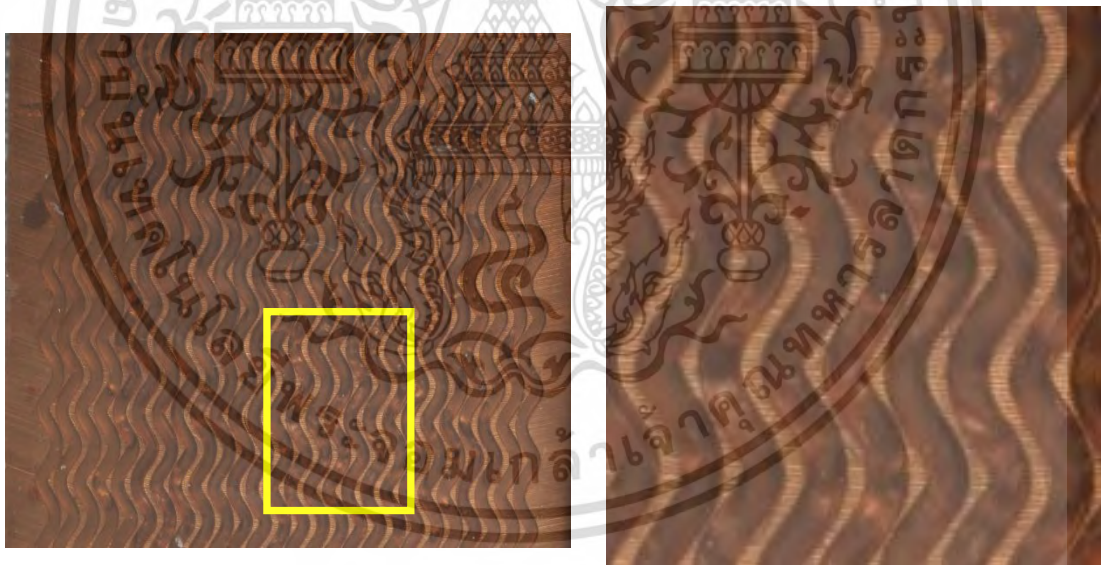


รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ slug ในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

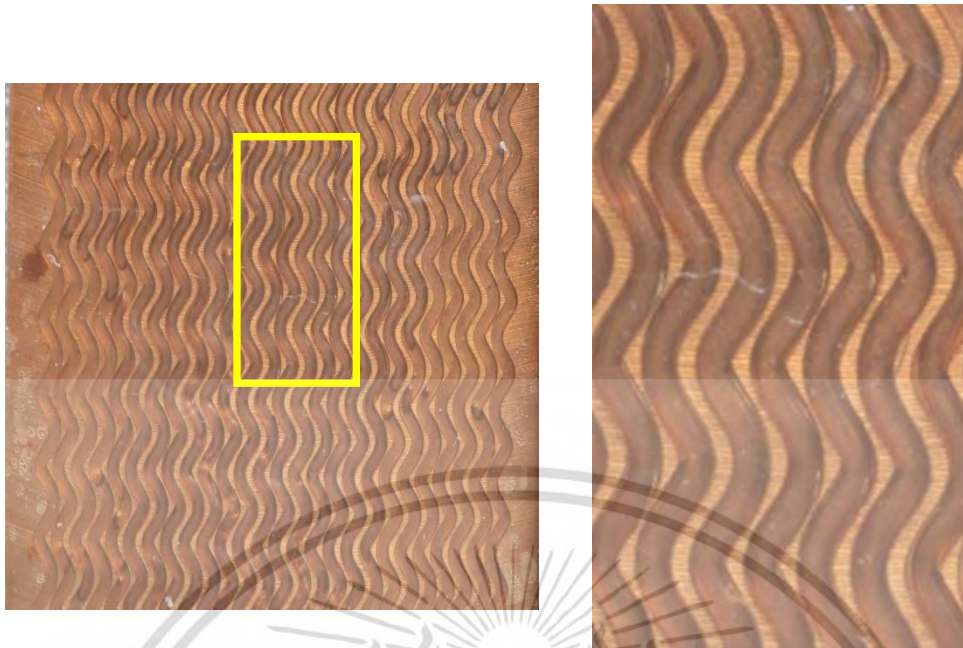


รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ throat-annular ในแนวนอน



รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ churn ในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

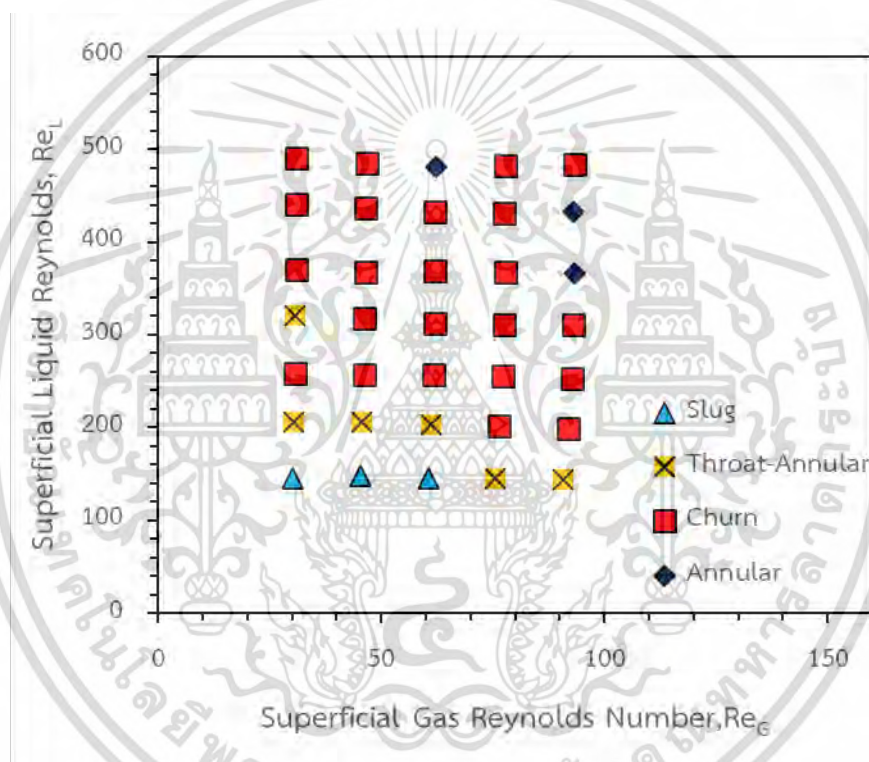


รูปที่ 4.17 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ annular ในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 รูปแบบการไหลในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลง

จากการทดลองพบว่า เกิดรูปแบบการไหลในท่อไมโครรูปคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลง ทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ การไหลแบบ slug, การไหลแบบ throat-Annular, การไหลแบบ churn, การไหลแบบ annular ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.19 – 4.22 พบว่าจะเกิดการไหลแบบ slug ที่  $Re_L$  เท่ากับ 144 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 – 60 จะเกิดการไหลแบบ throat-annular ที่  $Re_L$  เท่ากับ 145 – 320 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 – 90 จะเกิดการไหลแบบ churn ที่  $Re_L$  เท่ากับ 199 – 483 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 31 – 93 จะเกิดการไหลแบบ annular flow ที่  $Re_L$  เท่ากับ 366 – 481 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 62 – 93



รูปที่ 4.18 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะในท่อไมโครรูปคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลง

### 1. Slug flow

จะเกิดขึ้นที่ค่าเลขเรย์โนลด์ของน้ำและอากาศมีค่าต่ำ ๆ ดังรูป 4.19 โดยจุดที่เกิดขึ้นจะเป็นบริเวณตรงกลางของท่อไมโคร และจะกระจายออกไปทางด้านข้างเล็กน้อย โดยมีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ มีรูปร่างคล้ายกับหัวกระสุน ซึ่งมีความยาวของฟองอากาศมากกว่าฟองแบบ Bubbly flow เพียงเล็กน้อย ระหว่างแต่ละฟองสลักจะถูกคั่นด้วยของเหลวซึ่งเรียกว่า Liquid slug โดยลักษณะของฟองอากาศในแนวตั้งแบบไหลลงจะมีหัวกระสุนเรียวเล็กตามทิศเดียวกับแรงโน้มถ่วงเล็กน้อย

### 2. Throat-Annular flow

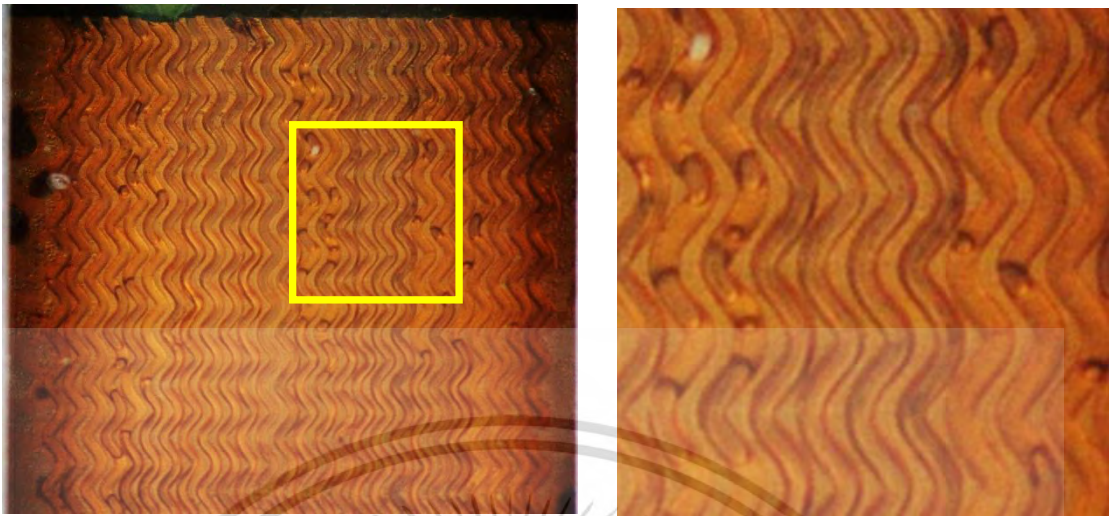
จะเกิดขึ้นที่ค่าเลขเรย์โนลด์ของน้ำที่ค่าต่ำ ๆ แต่เลขเรย์โนลด์ของอากาศมีค่าสูง ๆ ดังรูป 4.20 โดยจุดที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณโดยส่วนใหญ่กระจายไปรอบ ๆ ท่อไมโคร โดยมีลักษณะเป็นฟองอากาศที่ถูกล้อมรอบด้วยฟิล์มของเหลว มีความยาวตลอดทั้งความยาวของท่อไมโคร ซึ่งมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากันตลอดทั้งฟองอากาศ โดยมีบางจุดที่เป็นจุดเชื่อมระหว่างฟองอากาศทั้งสองฟองเหมือนเป็นคอคอตรงระหว่างฟองอากาศที่ต่อเนื่องกัน โดยลักษณะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงตึงผิวที่เลขเรย์โนลด์ของอากาศมีค่าสูงขึ้น ซึ่งมักจะพบในท่อขนาดเล็ก

### 3. Churn flow

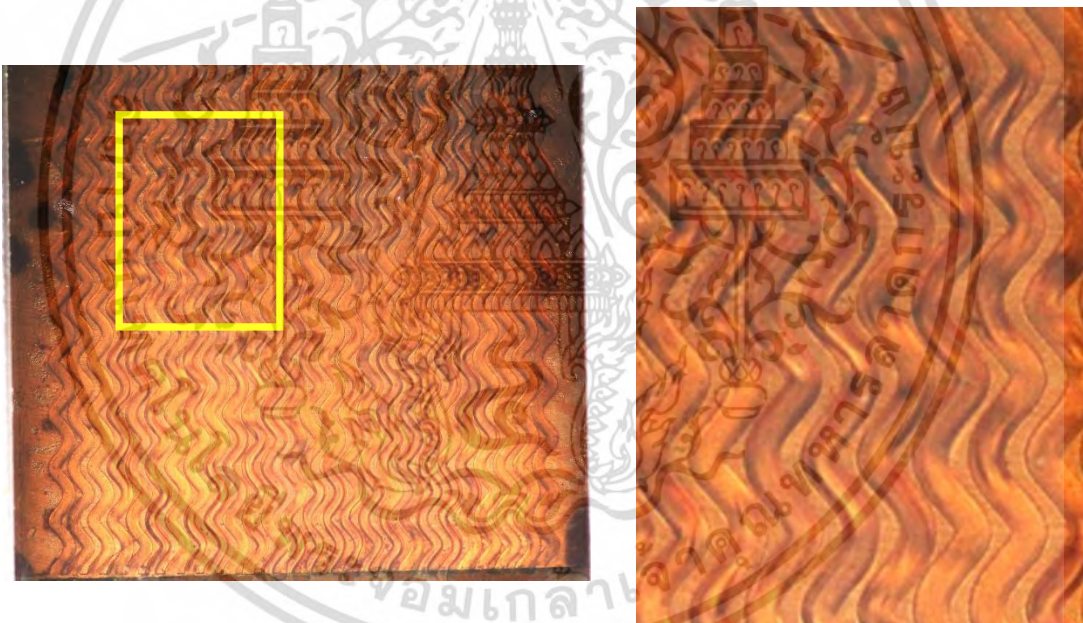
จากแผนที่รูปแบบการไหลจะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลประเภทนี้จะเกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่ตลอดการทดลอง ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำและอากาศทั้งต่ำและสูงปานกลาง โดยจะเกิดกระจายรอบ ๆ ท่อไมโคร ซึ่งเป็นรูปแบบที่ต่อเนื่องมาจาก Throat-Annular flow โดยทั่วไปจะมีรูปร่างไม่แน่นอน จากที่เห็นในรูป 4.21 พบว่ามีลักษณะขุ่นๆ และมีความขรุขระ ของฟองอากาศที่มีความยาวตลอดทั้งท่อไมโคร โดยคาดว่าเกิดจากความปั่นป่วนเนื่องจากเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ฟองอากาศมีลักษณะโครงสร้างไม่เสถียร

### 4. Annular flow

มักจะเกิดขึ้นที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำและอากาศมีค่าสูง ๆ ดังรูป 4.22 ซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณตรงกลางของท่อไมโคร และกระจายออกมาทางขวเล็กน้อย โดยมีลักษณะแกนอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศเท่า ๆ กันไหลตลอดความยาวท่อไมโคร ล้อมรอบด้วยของเหลวที่เป็นชั้นฟิล์มกั้นไว้ระหว่างอากาศกับผนังท่อ ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของน้ำและอากาศมากกว่าขอบเขตที่ทำให้การทดลอง คาดว่าจะเกิดการไหลแบบ Annular flow มากกว่านี้

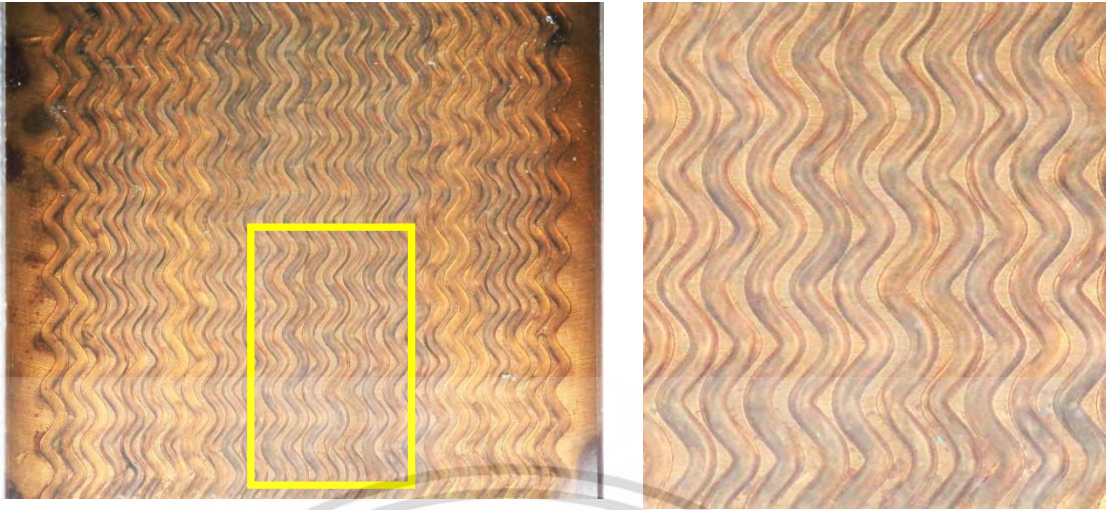


รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ slug ในแนวตั้งไหลลง

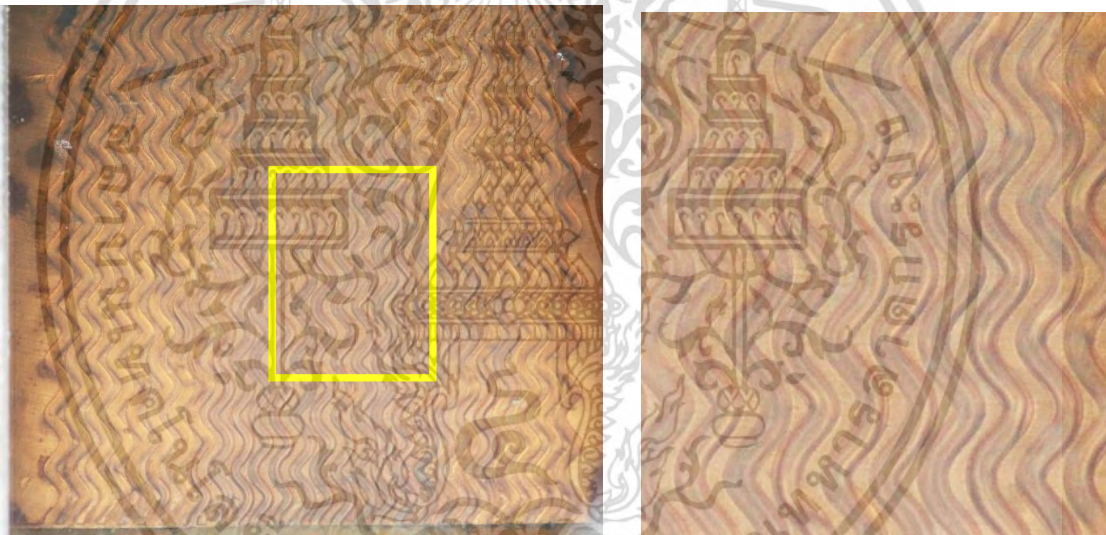


รูปที่ 4.20 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ throat-annular แนวตั้งไหลลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ churn ในแนวตั้งไหลลง

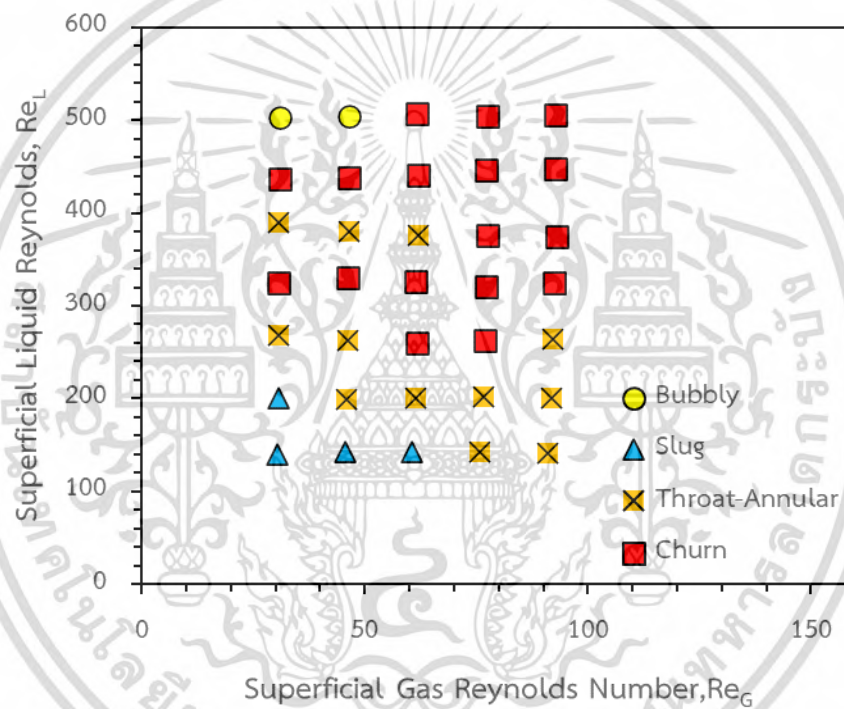


รูปที่ 4.22 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ annular ในแนวตั้งไหลลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 รูปแบบการไหลในท่อคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลขึ้น

จากการทดลองพบว่า เกิดรูปแบบการไหลในท่อไมโครรูปคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลขึ้น ทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ การไหลแบบ bubbly, การไหลแบบ slug, การไหลแบบ throat-annular, การไหลแบบ churn ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.24 – 4.27 พบว่าจะเกิดการไหลแบบ slug ที่  $Re_L$  เท่ากับ 139 - 200 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 - 60 จะเกิดการไหลแบบ throat-annular ที่  $Re_L$  เท่ากับ 141 - 389 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 - 91 จะเกิดการไหลแบบ churn ที่  $Re_L$  เท่ากับ 259 - 506 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 31 - 92 จะเกิดการไหลแบบ bubbly ที่  $Re_L$  เท่ากับ 502 - 505 ที่  $Re_G$  เท่ากับ 30 - 46



รูปที่ 4.23 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะในท่อไมโครรูปคลื่นที่มีการวางตัวในแนวตั้งแบบไหลลง

## 1. Bubbly flow

รูปแบบการไหลแบบ bubbly flow มีฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ หลายขนาดกระจายอยู่ทั่วของเหลว ปัจจัยทั้งการกระจายตัว ขนาดและรูปร่างของฟองอากาศ จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหล เมื่ออัตราการไหลของอากาศและน้ำน้อยมาก ฟองอากาศแต่ละฟองจะไหลขึ้นตามแนวแกนของเหลว และจับตัวเป็นกลุ่มกันจนกระทั่งเป็นฟองขนาดใหญ่มากขึ้น ในขณะที่ถ้าให้ความเร็วของอากาศคงที่ แล้วเพิ่มความเร็วของน้ำ ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะแตกกระจายทั่วเป็นฟองเล็ก ๆ อยู่ทั่วของเหลว และจะเกาะกลุ่มกันน้อยลง แต่ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นจะทำให้เกิดฟองอากาศและเกาะกลุ่มกันมากขึ้นจนกระทั่งรูปแบบการไหลนี้มีแนวโน้มเปลี่ยนรูปแบบการไหลเป็นรูปแบบ slug flow

## 2. Slug flow

จะประกอบไปด้วยกลุ่มของเหลวอยู่แยกสลับกับฟองอากาศแนวยาว รวมถึงการไหลที่มีลักษณะโค้งจึงสามารถสังเกตได้ในรูปแบบการไหลได้อย่างชัดเจน และสามารถประมาณรูปร่างส่วนหัวและความกว้างของตัวฟองมีขนาดใกล้เคียงกันกับกระสุน ฟองอากาศนี้ถูกแยกออกจากผนังด้านข้างด้วยชั้นของเหลวบาง ๆ และนอกจากมีฟองอากาศแนวยาว แล้ว ยังมีฟองอากาศเล็ก ๆ จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วของเหลว หากเพิ่มความเร็วของของเหลวจะส่งผลให้รูปแบบการไหลแบบ slug flow มีแนวโน้มเปลี่ยนไปเป็นรูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow

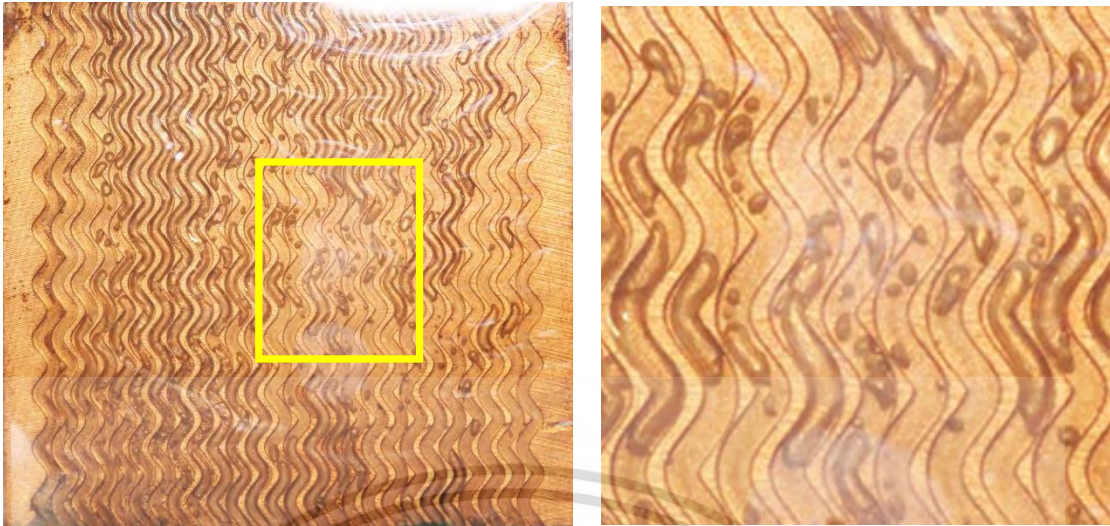
## 3. Throat-Annular flow

จากการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของแก๊ส ทำให้ฟองน้ำหายไปและถูกแทนที่ในรูปของแกนอากาศ การไหลของของเหลวมีไม่เพียงพอที่จะสามารถทำให้คงสภาพของฟองของเหลวให้ปกติได้ และเนื่องจากฟองอากาศเป็นจำนวนมากรวมถึงเป็นการไหลในท่อที่มีลักษณะโค้งจึงทำให้มีการไหลเข้าสู่ศูนย์กลาง ส่งผลให้แกนอากาศมีลักษณะที่บิดเบี้ยวเป็นคอคอด หากมีความเร็วของของไหลมาก รูปแบบการไหลนี้มีแนวโน้มเปลี่ยนเป็น slug flow ได้

## 4. Churn flow

การเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบการไหล slug flow ไปเป็นรูปแบบการไหล churn flow จะเกิดเมื่อหัวของฟอง slug หนึ่งไปชนกับหางของอีกฟอง slug หนึ่ง จนผสมกันจนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ไม่ปกติ เพราะเหตุนี้ฟองของ slug จะหายไปและผสมกันจนปั่นป่วนกลายเป็นช่วงระหว่างของเหลวที่พร้อมจะแยกเป็นฟองอากาศ ยิ่งความเร็วของน้ำและอากาศมากขึ้น การไหลจะยิ่งมีความปั่นป่วนมากจนกระทั่งเป็นฟองชุ่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

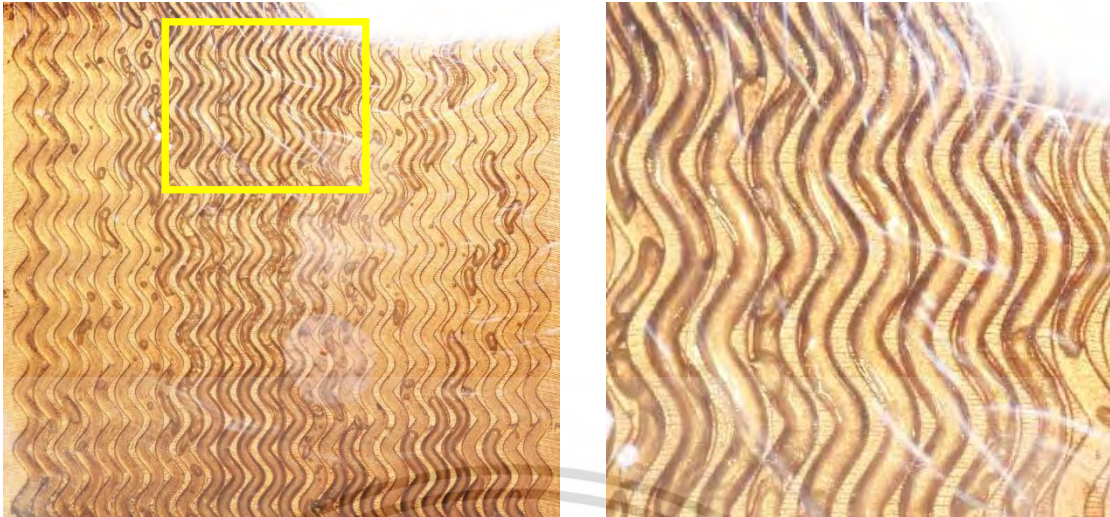


รูปที่ 4.24 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ bubbly ในแนวตั้งไหลขึ้น

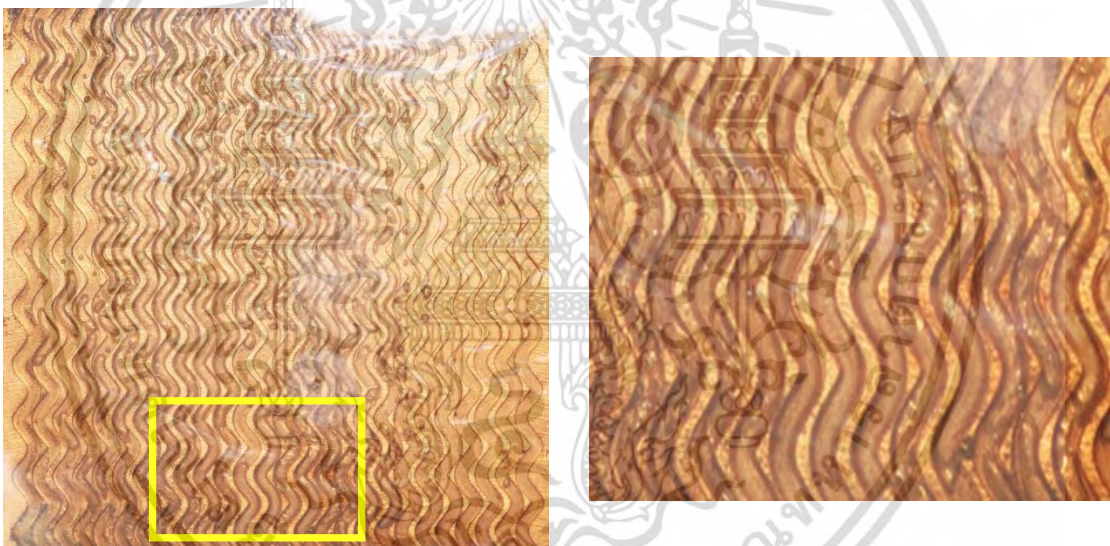


รูปที่ 4.25 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ slug ในแนวตั้งไหลขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ throat-annular ในแนวตั้งไหลขึ้น

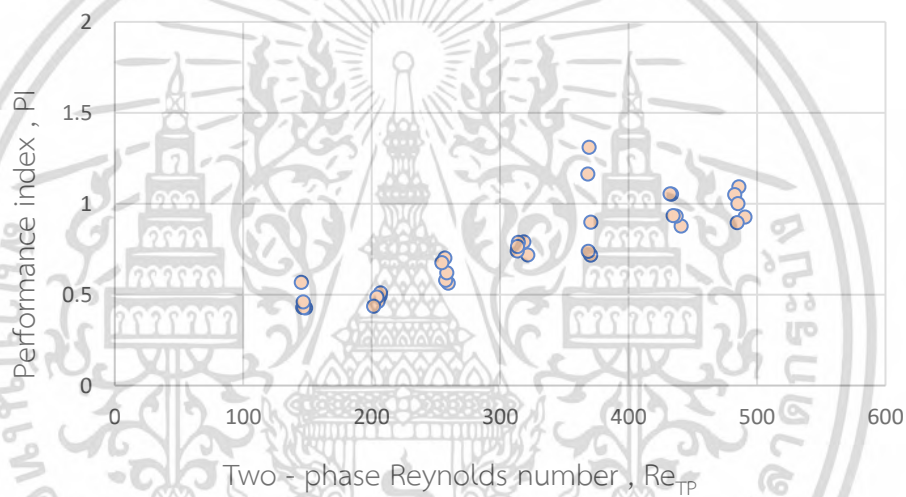


รูปที่ 4.27 แสดงตัวอย่างรูปแบบการไหลแบบ churn ในแนวตั้งไหลขึ้น

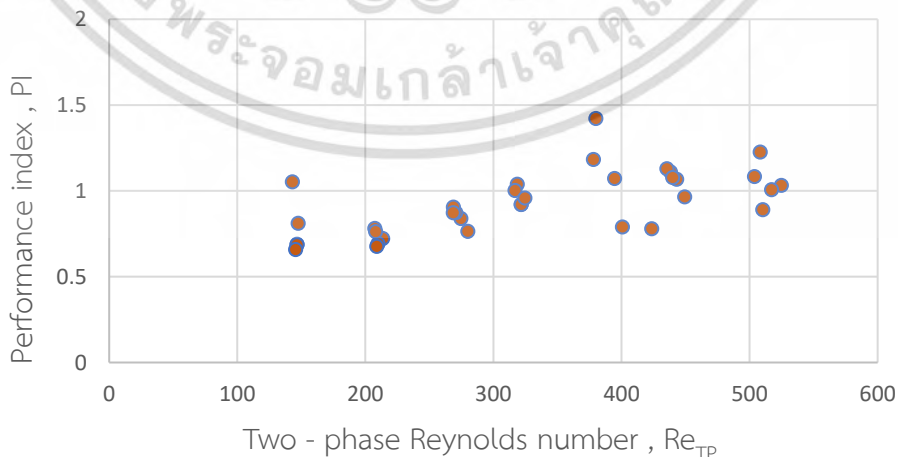
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Performance index, PI)

จากการศึกษาทดลองการไหลของของไหลสองสถานะในท่อไมโครรูปคลื่นที่มีรูปแบบการจัดวาง 3 รูปแบบ ประกอบด้วย แนวนอน แนวตั้งไหลลง และแนวตั้งไหลขึ้น ในทุกกรณีพบว่าค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะแปรผันตรงกับความดันลดที่วัดได้ ดังนั้นในการเลือกช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง Hashemi et al. (2012) ได้เสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน ไว้ดังสมการที่ 2.30 อธิบายให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลของการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของค่าการถ่ายเทความร้อนเป็นตัวเลขนัทเชิลท์ ต่อการเพิ่มขึ้นของความดันลดที่เป็นอัตราส่วนเช่นกัน โดยค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สนใจจะเป็นสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการจัดวางในแนวตั้งแบบไหลขึ้นเทียบกับแนวนอน และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการจัดวางในแนวตั้งแบบไหลลงเทียบกับแนวนอน



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อไมโครแบบคลื่นที่มีการจัดวางในแนวตั้งแบบไหลขึ้น



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อไมโครแบบคลื่นที่มีการจัดวางในแนวตั้งแบบไหลลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 แสดงกราฟสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในท่อไมโครแบบเคลื่อนที่จัดวางในแนวตั้งแบบไหลขึ้น พบว่าค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำกว่า 1 ที่ช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะมีค่าน้อย จนเมื่อเพิ่ม  $Re_{TP}$  ไปจนถึงประมาณ 368 จะทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่า 1 จนมีค่าสูงสุดที่  $Re_{TP}$  ประมาณ 369 เมื่อเพิ่ม  $Re_{TP}$  ขึ้นไปอีกแล้วค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะตกลงมาอย่างต่อเนื่อง จนเกาะกลุ่มที่ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนประมาณ 0.87 – 1.09 และจากรูปที่ 4.27 แสดงกราฟสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลภายในท่อไมโครแบบเคลื่อนที่จัดวางในแนวตั้งแบบไหลลง พบว่ามีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่า 1 ที่  $Re_{TP}$  ประมาณ 143 แล้วค่าจะตกลงมาเมื่อเพิ่ม  $Re_{TP}$  จะกระทั่งที่  $Re_{TP}$  ประมาณ 209 ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆเพิ่มจนถึงจุดสูงสุดที่  $Re_{TP}$  ประมาณ 380 โดยมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนประมาณ 1.43 หลังจากนั้นค่าจะลงมาและเริ่มเกาะกลุ่มที่ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนประมาณ 0.96 – 1.22 โดยเมื่อเราทำการเปรียบเทียบกราฟสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลแนวตั้งแบบไหลขึ้นเทียบกับการไหลแนวตั้งแบบไหลลง พบว่าเมื่อพิจารณาช่วง  $Re_{TP}$  มีค่าต่ำ ๆ แนวโน้มของสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของการไหลแนวตั้งแบบไหลลงจะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าการไหลในแนวตั้งแบบไหลขึ้น โดยจุดที่เกิดสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของทั้งสองกราฟเกิดขึ้นที่  $Re_{TP}$  ใกล้เคียงกันที่ 369 – 380 หลังจากนั้นค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของทั้งสองแนวจะมีแนวโน้มพฤติกรรมใกล้เคียงกันคือจะเริ่มเกาะกลุ่มกันใกล้ๆกับ 1 เมื่อเพิ่มค่า  $Re_{TP}$  ขึ้น และมีแนวโน้มจะเพิ่มมากกว่านี้ ซึ่งถ้าพิจารณาโดยรวมตลอดช่วงที่ทำการทดลองพบว่าการไหลในแนวตั้งแบบไหลลง ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งบ่งบอกว่าการไหลในท่อไมโครรูปเคลื่อนที่มีการไหลในแนวตั้งแบบไหลลงมีประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการนำไปปฏิบัติจริงมากกว่าการไหลแบบแนวตั้งแบบไหลขึ้น ซึ่งให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์ที่สูงกว่าก็จริง แต่ก็ให้ความดันลดที่สูงมากเช่นกัน ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมที่จะนำไปปฏิบัติงานจริง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและศึกษารูปแบบการไหล ของการไหลของไหลสองสถานะ(อากาศกับน้ำ) ภายในท่อสี่เหลี่ยม ท่อไมโครแบบคลื่น มีขนาดพื้นที่หน้าตัดกว้าง 0.8 มม.ความลึก 0.5 มม. ความกว้างของครีป 0.5 มม. ความยาวในแนวตรง 40 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.62 มม. มีจำนวนท่อทั้งหมด 26 ท่อ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครที่มีการจัดวางแนวท่อแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ ไหลตามแนวนอน แนวตั้งไหลลง แนวตั้งไหลขึ้น และเปรียบเทียบว่าการไหลในแนวใดให้ผลการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด ในสภาวะที่ไม่มีการเดือด และพลั๊กความร้อนที่ง่ายคงที่ ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำในช่วง 100 ถึง 400 CCM และอัตราการไหลของอากาศในช่วง 0.5 ถึง 1.5 LPM สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในการเปรียบเทียบการไหลสองสถานะในท่อไมโครแบบคลื่นที่มีจัดวางแนวทางการไหลแบบแนวนอน แบบแนวตั้งไหลขึ้น และแบบแนวตั้งไหลลง โดยแสดงเป็นตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะ และตัวเลขนัสเซิลท์ พบว่าทั้งสามกรณีให้ค่าตัวเลขนัสเซิลท์แปรผันตามเลขเรย์โนลด์สองสถานะ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการพาความร้อนแบบบังคับ

2. สำหรับการไหลสองสถานะในท่อไมโครแบบคลื่นที่มีจัดวางต่างกัน 3 แนว พบว่า ผลการถ่ายเทความร้อนของการจัดวางในลักษณะแนวตั้งแบบไหลขึ้นให้ผลออกมาดีที่สุดในบรรดารูปแบบการจัดวางทั้งหมด

3. จากการศึกษาทดลองเรื่องความดันลดของการไหลสองสถานะในท่อไมโครแบบคลื่น พบว่าการจัดวางแนวทั้ง 3 กรณี ความดันลดที่วัดได้จากตัวแปลงสัญญาณแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำค่าความดันลดที่วัดได้มาคำนวณให้อยู่ในรูปตัวประกอบความเสียดทาน พบว่ามีแนวโน้มแปรผกผันกับค่าเลขเรย์โนลด์สองสถานะ

4. สำหรับการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลสองสถานะในท่อไมโครแบบคลื่นที่มีการจัดวางต่างกัน 3 แนว พบว่า ค่าตัวประกอบความเสียดทานของการจัดวางแบบแนวตั้งไหลขึ้นมีค่ามากที่สุดในบรรดารูปแบบการจัดวางทั้งหมด อันเนื่องมาจากการไหลที่สวนทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับแรงโน้มถ่วง ทำให้ปั้มน้ำกับปั้มลมต้องใช้กำลังงานมาก ส่งผลให้ความดันลดที่วัดได้มีค่ามากที่สุดในทุกกรณี

5. จากการศึกษาทดลองเรื่องแผนทีรูปร่างการไหลสองสถานะในท่อไมโครแบบคลื่น พบว่าทุกกรณีการจัดวางแนวทางการไหล เกิดรูปแบบการไหลทั้งหมด 5 แบบ คือ slug , bubbly , churn , throat-annular และ annular โดยที่ slug จะเกิดขึ้นทั้งสามกรณีที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะมีค่าต่ำ ๆ แต่เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะมีค่าเพิ่มขึ้นจะเกิด throat-annular เมื่อมีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะส่งผลเป็น churn ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลที่พบมากที่สุดในทุกรูปแบบการจัดวาง โดยมีเพียงการไหลแบบแนวนอนและแนวตั้งแบบไหลลงที่จะเกิด annular flow ตามมา ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลที่มักเกิดขึ้นที่ตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะมีค่าสูงมาก ๆ และเป็นรูปแบบการไหลที่ให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

6. ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแนวตั้งทั้งสองแนวการไหลเมื่อเทียบกับแนวนอน จะให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่า 1 เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะมีค่าต่ำ ๆ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจนเกาะกลุ่มใกล้ ๆ กับ 1 เมื่อเพิ่มค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะมากขึ้นเรื่อยๆ โดยที่การไหลสองสถานะในแนวตั้งแบบไหลลงให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนโดยรวมมากกว่าการไหลสองสถานะในแนวตั้งแบบไหลขึ้น บ่งบอกได้ว่าการไหลแบบแนวตั้งแบบไหลลงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานจริงมากกว่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการปรับแก้การกระจายของรูปแบบการไหลให้มีการกระจายให้เต็มตลอดทุกช่องของท่อไมโครและควรใช้เทคนิคและอุปกรณ์การถ่ายภาพที่ดีกว่านี้เพื่อความสะดวกชัดของภาพรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นทำให้สามารถจำแนกได้อย่างถูกต้อง

2. ควรมีการสอบเทียบวัดเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองอาทิ เช่น โรตاميเตอร์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ และเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิของท่อไมโคร ให้มีความแม่นยำเพื่อให้ผลการทดลองที่ตรงตามทฤษฎี

3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบการถ่ายเทความร้อน , ความดันลด และรูปแบบการไหล เมื่อเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำท่อไมโครจากทองแดงเป็นวัสดุอื่น ๆ เช่น เงิน ทองเหลือง เหล็ก อลูมิเนียม เป็นต้น

4. ควรศึกษางานวิจัยที่จะนำสมการสหสัมพันธ์มาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง ให้มี

รูปแบบการทดลองและเงื่อนไขเริ่มต้นใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุดเท่าที่จะทำได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- ปฐุม เอี่ยมศิลป์ชัย และ ผศ.ดร.มจรุส สุชาตะวัฒน์ (2018). การศึกษาทดลองรูปแบบการไหลแบบสองสถานะและการถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครฮีตซิงก์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32, จังหวัดมุกดาหาร
- พลรัตน์ กลิ่นดี, มาวิน คณะบุตร และ ศุภกิตต์ รื่นรัมย์ (2019). การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของน้ำ-อากาศในท่อไมโครรูปคลื่น, ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- โพธิ์ชัย ศรีทุมพันธ์ (2019). การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนขณะเดือดในท่อไมโครฮีตซิงก์ที่มีทิศทางแตกต่างกัน, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- A.Sur, D.Lui, **Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels**, International Journal of Thermal Sciences, 53, 2012, 18-34
- Chisholm. D, **Two-Phase Flow in Pipeline and Heat Exchangers**, Pitman Press Ltd, Bath, England, 1983.
- Issam Mudawar, **Two-Phase Microchannel Heat Sinks: Theory, Applications and Limitations**, Purdue University International Electronic Cooling Alliance (PUIECA), Vol.133, ASME 2011
- J. C. Chen, **Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convection flow**, Ind. Eng. Chem. Res., 5, 1966, pp, 322-329
- M.T. Kreutzer, F. Kapjin, J.A. Moulijin, J.J. Heiszwolf, **Multiphase monolith reactor: Chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels**, Chemical Eng, 2005, 5895-5916.
- Kalb, C. E., and Seader, J. D., **Heat and Mass Transfer Phenomena for Viscous Flow in Curved Circular Tubes**, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 801–817, 1972
- Mehdi Ghobadil, Yuri Stephan Muzychka, **a Review of Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Laminar Flow in Curved Circular Ducts**, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, 37(10): 815–839, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Owens. W.L, **Two-phase pressure gradient**, in: International Development in Heat Transfer, Part II, ASME, New York, United States, 1961.
- Philip E. Haines, **Dean Vortices in finite-aspect-ratio ducts**, Journal of Fluid Mechanics 716:8, February 2013
- Pansunee Suwankamnerd, Somchai wongwises, **an experimental study of two-phase air-water flow and heat transfer characteristics of segmented flow in microchannel**, Mechanical Eng. KMUTT, Experimental Thermal and Fluid Science Vol.62 (2015) 29 – 39.
- P.S. Lee, S.V. Garimella, D. Liu, **Investigation of heat transfer in rectangular microchannels**, International Journal in Heat Mass Transfer. 48 (2005) 1688 – 1704
- Satish G. Kandlikar, **Scale effects on flow boiling heat transfer in microchannels: A fundamental perspective**, International journal of Thermal science 49 (2010) 1073-1085.
- Satish G. Kandlikar, Prabhu Balasubramanian, **An Experimental Study on the Effect of Gravitational Orientation on Flow Boiling of Water in Parallel Minichannels**, Thermal Analysis and Microfluidics Laboratory, Mechanical Eng. Rochester Institute of Technology, Vol 127, ASME 2005
- S. Saisorn, P. Wongpromma, S. Wongwises, **the difference in flow pattern, heat transfer and pressure drop characteristics of mini-channel flow boiling in horizontal and vertical orientations**, International journal of multiphase Flow, January 2018
- S. Saisorn, S. Wongwises, **Adiabatic two-phase gas-liquid flow behaviors during upward flow in a vertical circular micro-channel**, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.69 (2015), pp.158 – 168
- S.M. Hashemi, M.A. Akhavan-Behabadi, **An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux**, International in heat and mass transfer 39(2012), 144-151

Sui. Y, Lee P.S, Teo C.J, **An experimental study of flow friction and heat transfer in wavy Microchannels with rectangular cross section**, Mechanical Engineering, National University of Singapore, International Journal of Thermal Sciences 50 (2011) 2473-2482.

Vikrant Siddharudh Chalgeri, Ji Hwan jeong, **Flow patterns of vertically upward and downward air-water two-phase flow in a narrow rectangular channel**, International journal of heat and mass transfer. 128(2019) 934 – 95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ยกตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวของของไหลกระทำกับส่วนผนังท่อ

สมมติการคำนวณหาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวของของไหลในแนวตั้งแบบไหลขึ้นที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.5 LPM

$$\text{จากสมการ } \left( \frac{dP}{dz} \right)_{TP} = \left( \frac{dP}{dz} \right)_f + \left( \frac{dP}{dz} \right)_{ace} + \left( \frac{dP}{dz} \right)_c + \left( \frac{dP}{dz} \right)_e + \left( \frac{dP}{dz} \right)_g$$

1. พจน์ทางซ้ายเราสามารถอ่านค่าจากตัวแปรสัญญาณแรงดัน
2. แทนค่าในพจน์ความดันลดเนื่องจากความเร่ง

$$\begin{aligned} \left( \frac{dP}{dz} \right)_{Acceleration} &= G^2 \left[ \left( \frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{outlet} - \left( \frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{inlet} \right] \\ \left( \frac{dP}{dz} \right)_{Acceleration} &= 161.72^2 \left[ \left( \frac{0.00568^2}{1.1146 \times 0.962} + \frac{(1-0.00568)^2}{(1-0.962) \times 990.725} \right)_{outlet} - \left( \frac{0.00568^2}{1.1676 \times 0.962} + \frac{(1-0.00568)^2}{(1-0.962) \times 996.18} \right)_{inlet} \right] \\ \left( \frac{dP}{dz} \right)_{Acceleration} &= 2.8673 \end{aligned}$$

3. แทนค่าในพจน์ความดันลดเนื่องจากการลดและขยายขนาดช่องทางพื้นที่การไหล

$$\begin{aligned} \left( \frac{dP}{dz} \right)_{contraction} &= \frac{G^2}{2\rho_L} \left[ \left( \frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 + \left( 1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \left[ 1 + \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) x \right] \\ \left( \frac{dP}{dz} \right)_{contraction} &= \frac{161.72^2}{2 \times 997} \left[ \left( \frac{1}{0.2281} - 1 \right)^2 + \left( 1 - \frac{1}{0.0369^2} \right) \right] \left[ 1 + \left( \frac{997}{1.184} - 1 \right) 0.00568 \right] \\ \left( \frac{dP}{dz} \right)_{contraction} &= -57186.80536 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{expansion}}^1 = G^2 \gamma (\gamma - 1) \left[ \frac{1 - x^2}{\rho_L (1 - \alpha)} + \frac{x^2}{\alpha \rho_G} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{expansion}} = 161.72^2 \times 0.0369 (0.0369 - 1) \left[ \frac{1 - 0.00568^2}{997 (1 - 0.962)} + \frac{0.00568^2}{0.962 \times 1.184} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{expansion}} = -24.3404653358352$$

4. แทนค่าพจน์ความดันลดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เกิดขึ้นเฉพาะแนวตั้ง)

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{gravitational}} = gL \sin \theta (\alpha \rho_G + (1 - \alpha) \rho_L)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{gravitational}} = 9.81 \times 0.04 \times (-1) (0.962 \times 1.184 + (1 - 0.962) 997)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{gravitational}} = -15.4937629$$

5. นำค่าทั้งหมดไปแทนค่าในสมการหลักเพื่อหาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวของของไหล

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{friction}} = f_{TP} \frac{1}{D_h} \frac{G^2}{2 \rho_{TP}} = 62090.439$$

จะได้ว่าค่า  $f_{TP} = 0.504385743$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ยกตัวอย่างการคำนวณวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล

สมมติการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะที่วางตัวในแนวตั้งแบบไหลขึ้นที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 1 LPM

ตัวแปรที่ต้องใช้ ได้แก่

$T_{in}(^{\circ}C)$	$T_{out}(^{\circ}C)$	$T_{ave,fluid}(^{\circ}C)$	$T_{air inlet}(^{\circ}C)$	$T_{wall}(^{\circ}C)$
29.9	37.9	33.92	25.0	39.6

1. สมมติค่า  $\eta_i = 1.00$

2. แทนค่าลงในสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}}{N(A_{ch} + 2A_{cs}\eta)(T_w - T_m)}$$

$$h = \frac{83.5}{26 \times (0.000032(m^2) + (2 \times 1 \times 0.00002(m^2) \times ((273 + 39.65) - (273 + 33.92)))}$$

$$h = 7784.4155(W / m^2 \cdot K)$$

3. แทน  $h$  ลงในสมการ  $m = \sqrt{\frac{2h}{k_{cu} S_f}}$

$$m = \sqrt{\frac{2 \times 7784.4155(W / m^2 \cdot K)}{399.8278(W / m \cdot K) \times 0.005(m)}}$$

$$m = 88.2482$$

4. แทนค่า  $m$  ลงในสมการ  $\eta = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f}$

$$\eta_f = \frac{\tanh(88.2482 \times 0.0005)}{88.2482 \times 0.0005}$$

$$\eta_f = 0.999351$$

5. จะพบว่าประสิทธิภาพที่นำมาแทนในครั้งแรกมีค่าไม่เท่ากับค่าประสิทธิภาพที่ได้

$$(\eta_i \neq \eta_f)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สมมติ  $\eta_i$  ขึ้นมาใหม่ และทำตามขั้นตอนที่ 2-5 จน  $\eta_i = \eta_f$  จะได้  
 $h = 7822.1907 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$

ยกตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าเลขนัสเซิลท์เฉลี่ย

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f}$$

$$Nu = \frac{7822.1907(\text{W / m}^2 \cdot \text{K}) \times 0.000615385}{0.62128(\text{W / m} \cdot \text{K})}$$

$$Nu = 7.7479$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่ากำลังปั๊มน้ำ

หาค่ากำลังจาก Head loss

$$H_L = \text{Major loss} + \text{Minor loss} = H_{Lf} + H_{Le}$$

โดยที่  $H_{Lf} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$

$$H_{Le} = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

คำนวณหา Major loss และ Minor loss

ความยาวของสายยางจากถังน้ำไปถึงปั๊มน้ำ 0.15 m จากปั๊มน้ำไป flow meter 1.5 m จาก flow meter ไป mixing chamber 1.5 m และจาก test section ถึงถังรองน้ำ 0.5 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสายยาง 4 มม. มีอัตราการไหล 500 cm<sup>3</sup>/min สมมติให้น้ำมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้อง

หาค่า Major loss ของสายยาง

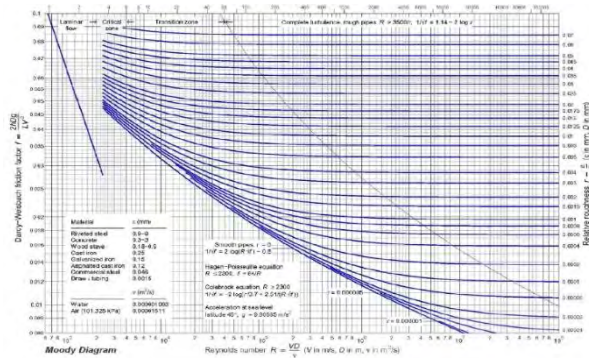
จาก  $Re = \frac{\rho V D_H}{\mu}$

$$= \frac{\rho \cdot \left( \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \right) \cdot D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\mu\pi D} = \frac{4 \times 997 \times \left( \frac{500 \times 10^{-6}}{60} \right)}{(0.891 \times 10^{-3}) \times \pi \times 0.004} = 2968$$

และค่า  $\varepsilon$  ของสายยางเท่ากับ 0.07 มม. ทำให้คำนวณค่าขรุขระสัมพัทธ์ได้

$$r = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.07 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 0.0175$$

นำค่า  $r$  และ  $Re$  ไปเปิดใน Moody diagram ที่อุณหภูมิ น้ำ 25°C เพื่อหาค่า  $f$  จะได้ค่า



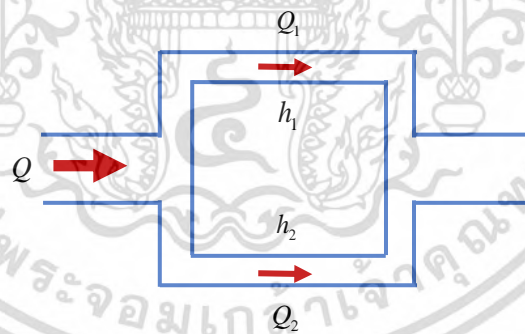
$f = 0.058$

แทนค่าหา  $H_{Lf}$  ของสายยาง

$$H_{Lf} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0.058 \times \left( \frac{0.15 + 1.5 + 1.5 + 0.5}{0.004} \right) \times \frac{\left( \frac{500 \times 10^{-6}}{60} \right)^2}{2 \times 9.81 \times \left( \frac{\pi}{4} \times 0.004^2 \right)} \approx 1.18 \text{ m.}$$

น้ำ

หาค่า Major loss ของ Test section



จากการแยกไหลของของไหลแบบขนาน

$Q = Q_1 + Q_2$  และ  $h_1 = h_2$

หาค่า  $f$  ของ test section เนื่องจากการไหลในท่อไมโครทองแดงทั้ง 26 ช่อง เป็นแบบ Laminar flow และพื้นที่หน้าตัดท่อเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง 8:5

หรือ 1.6:1 ซึ่งเราจะประมาณเมื่อ เป็น 2:1 จะได้ค่า  $f = \frac{62.20}{Re}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก 
$$V = \frac{\left(\frac{500 \times 10^{-6}}{60}\right) / 26}{0.0008 \times 0.0005} = 0.8 \text{ m/s}$$

แทนค่าหา  $H_{Lf}$  ของ test section

$$H_{Lf} = f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0.103 \times \left(\frac{0.04}{0.000615}\right) \times \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81} \approx 0.21 \text{ m.น้ำ}$$

หาค่า Minor loss ของ fittings และ accessories

- Ball valve, fully open  $K = 0.05$
- Tee, line flow, flange  $K = 0.2$
- Union, threaded  $K = 0.08 \times 3 = 0.24$
- Expansion  $K = 1 (180^\circ)$
- Contraction  $K = 0.5 (180^\circ)$

รวมค่า K ทั้งหมด  $0.05 + 0.2 + 0.24 + 1 + 0.5 = 1.99 \approx 2.00$

แทนค่า  $H_{Le} = K \cdot \frac{V^2}{2g} = 2.00 \times \frac{\left(\left(\frac{500 \times 10^{-6}}{60}\right) / \left(\frac{\pi}{4} \times 0.004^2\right)\right)^2}{2 \times 9.81} = 0.044 \text{ m.น้ำ}$

รวม  $H_L = (1.18 + 0.21) + 0.044 = 1.434 \text{ m.น้ำ}$

หา Input power ของปั๊มน้ำ

สมมติให้มีการสูบน้ำขึ้น 0.5 เมตรและประสิทธิภาพเท่ากับ 50%

$$\text{input power} = \frac{\rho g Q (H_L + (Z_2 - Z_1))}{\eta} = \frac{997 \times 9.81 \times (1.434 + 0.5)}{0.50} = 0.30 \text{ Watt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้