

ผลกระทบบของห้องผสมที่มีต่อการไหลสองสถานะแบบอะเดียแบติกของน้ำ-
อากาศที่ไหลในท่อไมโครแชนแนลซึ่งวางตัวในแนวตั้ง

EFFECTS OF MIXING CHAMBER ON ADIABATIC TOW-PHASE WATER-AIR
FLOW IN VERTICAL MICRO-CHANNELS

กฤติน ธาราสุข
KRITTIN THARASOOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-030-020

ผลกระทบบของห้องผสมที่มีต่อการไหลสองสถานะแบบอะเดียแบติกของน้ำ -
อากาศที่ไหลในท่อไมโครแชนเนลซึ่งวางตัวในแนวตั้ง

EFFECTS OF MIXING CHAMBER ON ADIABATIC TWO - PHASE WATER - AIR
FLOW IN VERTICAL MICRO - CHANNELS



T139444

กฤติน ธาราสุก
KRITTIN THARASOOK

ฉ.พ.
ก 277 ค
2658
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 139444
วัน.เดือน.ปี..... 3 พ.ย. 2558

.b.....
.i.....

12722686

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558
KMITL-2015-EN-M-030-020

EFFECTS OF MIXING CHAMBER ON ADIABATIC TWO - PHASE WATER - AIR
FLOW IN VERTICAL MICRO - CHANNELS

KRITTIN THARASOOK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKABANG
2015
KMITL-2015-EN-M-030-020

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของห้องผสมที่มีต่อการไหลสองสถานะแบบอะเดียแบติกของน้ำ-อากาศที่ไหลในท่อไมโครแชนเนลซึ่งวางตัวในแนวตั้ง

Thesis Title Effects of Mixing Chamber on Adiabatic Two-Phase Water - Air Flow in Vertical Micro - Channels

นักศึกษา นายกฤติน ธาราสุข






รหัสประจำตัว 55610952

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ศิระ สายศร

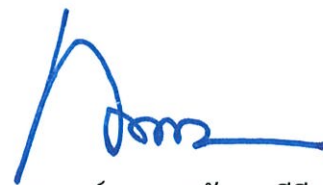
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-030-020

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
รศ.ดร.สมิทธิ์	เอี่ยมสอาด	
ดร.บำรุง	พ่วงเกิด	
ผศ.ดร.ศิระ	สายศร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของห้องผสมที่มีต่อการไหลสองสถานะแบบอะเดียแบติกของน้ำ - อากาศที่ไหลในท่อไมโครแชนเนลซึ่งวางตัวในแนวตั้ง
นักศึกษา	นายกฤติน ธาราสุข
รหัสประจำตัว	55610952
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ศิระ สายศร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของห้องผสมที่มีต่อการไหลสองสถานะแบบอะเดียแบติกของน้ำ - อากาศที่ไหลในท่อไมโครแชนเนลซึ่งวางตัวในแนวตั้ง (Effects of mixing chamber on adiabatic two-phase water-air flow in vertical micro-channels) การทดสอบนี้ใช้ท่อไมโครแชนเนล (Micro-channel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร โดยมีความยาว 104, 120 และ 320 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งมีความเร็วของอากาศ (Air superficial velocity, (j_g)) และความเร็วของน้ำ (Water superficial velocity, (j_l)) อยู่ในช่วง 0.3802-67.2093 เมตรต่อวินาที และ 0.0043-2.4675 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ การทดลองจะดำเนินการบนพื้นฐานของการไหลขึ้นตามแนวตั้ง รูปแบบการไหล (Flow pattern) ประกอบด้วย annular flow, annular-rivulet flow, churn flow, slug/annular alternating flow, slug flow และ throat-annular flow จากการนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับท่อไมโครแชนเนลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากัน ที่มีห้องผสม (Mixing chamber) ต่างกัน การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าห้องผสมมีผลต่อลักษณะของการไหลของการไหลสองสถานะ (Two-phase flow) ข้อมูลสัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ภาพ สำหรับท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร สำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร สัดส่วนช่องว่างจะพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าคุณภาพไอเชิงปริมาตร แต่ช่องขนาดเล็กจะพบว่ามีสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นกับค่าคุณภาพไอเชิงปริมาตร ผลการทดลองของความดันลด (Pressure drop) พบว่าความดันลดจากแรงเสียดทานที่ได้จากห้องผสมแบบ Cross-junction มีค่าสูงกว่าความดันลดที่ได้จากห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet นอกจากนี้พบว่า Two-phase frictional multiplier ไม่สามารถใช้ความสัมพันธ์เดียวในการทำนายข้อมูลสำหรับรูปแบบการไหลทั้งหมด

Thesis	Effects of Mixing chamber on Adiabatic Two - Phase Water - Air Flow in Vertical Micro - Channels
Student	Mr. Krittin Tharasook
Student ID.	55610952
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Sira Saisorn

ABSTRACT

Two-phase water - air flow characteristics are experimentally investigated in vertical circular micro - channels. The experiments are conducted in circular micro - channels of 0.15, 0.22 and 0.53 mm in inner diameter with the corresponding lengths of 104, 120 and 320 mm respectively. The test runs are done at superficial velocities of air and water ranging between 0.3802 - 67.2093 m/s and 0.0043 - 2.4675 m/s respectively. The experiments are carried out based on vertical upward flow. The flow patterns obtained include annular flow, annular-rivulet flow, churn flow, slug/annular alternating flow, slug flow and throat-annular flow. The present data are compared with those for micro - channels with comparable sizes. The comparisons indicate that mixing chamber has influence on two - phase flow characteristics. The void fraction data for 0.15, 0.22 and 0.53 mm diameter channel are obtained by image analysis. For 0.53 mm diameter channels the void fraction is found to be a linear relationship with the volumetric quality. But the smaller channels, the void fraction is found to be a nonlinear relationship with the volumetric quality. The results of the pressure drop are found that frictional pressure drops obtained from Cross-junction mixing chamber are higher than those from Y-junction with reducer inlet mixing chamber. Besides, the two - phase frictional multiplier is found that no single correlation can predict the data for all flow patterns.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ศิระ สายศร อาจารย์ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ นาย สราวุธ ลิ้มสุนันท์ นาย ศุภชัย บุญคง และ นางสาว ชลธิชา น้อยประทุม ที่ช่วยเหลือการเชื่อมการกวดขึ้นงานต่างๆรวมไปถึงการทำรูปเล่ม จนทำให้งานเกิดผลสำเร็จลุล่วงภายในระยะเวลาที่กำหนด

ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดคือบิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง โดยให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ จึงขอระลึกถึงในพระคุณและขอระลึกถึงในพระคุณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

กฤตินิ ธาธาสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 สํารวจเอกสาร.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 3 หลักการและพื้นฐานทางวิชาการ.....	8
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.2 แผนภูมิแสดงรูปแบบการไหล.....	9
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	10
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	10
4.1.1 รายละเอียดส่วนประกอบ.....	11
4.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	12
4.3 ข้อควรระวังในการทดลอง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	25
5.1 รูปแบบการไหลที่ได้จากการทดลอง.....	25
5.2 สัดส่วนช่องว่าง.....	50
5.3 ความดันลด.....	52
5.3.1 Frictional pressure drop บนพื้นฐานของ homogeneous flow model.....	61
5.3.2 Two-phase frictional multiplier.....	69
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต.....	75
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	83
ภาคผนวก ค.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ โดย Chisholm.....	56
ข.1 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุม ความดัน 0 - 4 บาร์.....	86
ข.2 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุม ความดัน 0 - 10 บาร์.....	86
ข.3 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	87
ข.4 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	88
ข.5 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุม ความดัน 0 - 4 บาร์.....	89
ข.6 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุม ความดัน 0 - 10 บาร์.....	89
ข.7 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	90
ข.8 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	91
ข.9 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุม ความดัน 0 - 4 บาร์.....	92
ข.10 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุม ความดัน 0 - 10 บาร์.....	92
ข.11 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	93
ข.12 การตรวจสอบระบบของน้ำ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	94
ค.1 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัว ควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	99
ค.2 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัว ควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	99
ค.3 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	100
ค.4 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.5 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	102
ค.6 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	102
ค.7 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	103
ค.8 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	104
ค.9 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	105
ค.10 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	105
ค.11 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์.....	106
ค.12 การตรวจสอบระบบของอากาศ Ø 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์.....	107

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร โดย Saisorn และ Wongwises.....4
2.2	ภาพสเก็ตรูปแบบการไหล โดย Saisorn และ Wongwises..... 5
2.3	แผนภูมิระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับคุณภาพปริมาตร โดย Saisorn และ Wongwises..... 5
2.4	รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร โดย Saisorn และ Wongwises.....6
2.5	แสดงรูปการไหลที่เกิดขึ้นในท่อแนวนอน..... 6
2.6	แสดงรูปการไหลที่เกิดขึ้นในท่อแนวตั้ง.....7
3.1	Bubbly Flow.....8
3.2	Plug Flow.....8
3.3	Stratified Flow..... 8
3.4	Wavy Flow.....8
3.5	Slug Flow.....8
3.6	Annular Flow..... 8
3.7	แผนภูมิรูปแบบการไหล..... 9
4.1	ไดอะแกรมของระบบ..... 10
4.2	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 1..... 12
4.3	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 2..... 13
4.4	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3..... 14
4.5	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3..... 15
4.6	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3..... 15
4.7	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 4..... 15
4.8	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 4..... 15
4.9	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 5..... 15
4.10	แสดงส่วนการทดสอบ..... 16
4.11	แสดงห้องผสม แบบ Cross-junction.....17
4.12	แสดงห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....18
4.13	แสดงตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ..... 19
4.14	แสดงเกจวัดความดัน..... 19
4.15	แสดงจอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิตอล..... 20
4.16	แสดงตัวแปลงสัญญาณความดัน.....20
4.17	แสดงตัวควบคุมความดัน..... 21
4.18	แสดงถังเก็บน้ำ..... 21
4.19	แสดงปั๊มลม..... 22
4.20	แสดงกล่องจุลทรรศน์..... 22
4.21	แสดงเครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Electronic Balance)..... 22
4.22	แสดงการใช้งานตัวควบคุมความดัน..... 23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23	แสดงช่วงความดันที่เกจแต่ละตัวรับได้.....24
5.1	รูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....25
5.2	รูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....26
5.3	รูปแบบการไหล \varnothing 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....27
5.4	รูปแบบการไหล \varnothing 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....28
5.5	รูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....29
5.6	รูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....30
5.7	รูปแบบการไหลสองสถานะในไมโครแชลแนลแนวตั้งในท่อขนาดต่างๆ.....31
5.8	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตร.....32
5.9	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตร.....33
5.10	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตร.....34
5.11	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตร.....35
5.12	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.22 มิลลิเมตร.....35
5.13	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตร.....36
5.14	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลที่ได้จากการวางตัวของท่อที่แตกต่างกัน.....36
5.15	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลที่ได้จากการวางตัวของท่อที่แตกต่างกัน.....37
5.16	ลักษณะการทำงานของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....37
5.17	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตรกับงานของBaker.....38
5.18	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.22 มิลลิเมตรกับงานของBaker.....39
5.19	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตรกับงานของBaker.....40
5.20	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตรกับงานของ Akbar และ คณะ.....41
5.21	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.22 มิลลิเมตรกับงานของ Akbar และ คณะ.....42
5.22	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตรกับงานของ Akbar และ คณะ.....43
5.23	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตรกับงานของ Wang และ คณะ.....44
5.24	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.22 มิลลิเมตรกับงานของ Wang และ คณะ.....45
5.25	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตรกับงานของ Wang และ คณะ.....46
5.26	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.15 มิลลิเมตรกับงานของ Ullmann และ Brauner.....47
5.27	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.22 มิลลิเมตรกับงานของ Ullmann และ Brauner.....48
5.28	แผนภูมิรูปแบบการไหล \varnothing 0.53 มิลลิเมตรกับงานของ Ullmann และ Brauner.....49
5.29	ข้อมูลสัดส่วนช่องว่างเทียบกับคุณภาพไอเชิงปริมาตร.....51
5.30	ความดันลด \varnothing 0.15 มิลลิเมตร.....53
5.31	ความดันลด \varnothing 0.22 มิลลิเมตร.....54
5.32	ความดันลด \varnothing 0.53 มิลลิเมตร.....55
5.33	เปรียบเทียบค่า c ที่ได้จากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน.....56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.34 ส่วนประกอบความดันลดจากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน ϕ 0.15 มิลลิเมตร.....	57
5.35 ส่วนประกอบความดันลดจากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน ϕ 0.22 มิลลิเมตร.....	57
5.36 ส่วนประกอบความดันลดจากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน ϕ 0.53 มิลลิเมตร.....	57
5.37 ความดันลดจากแรงเสียดทาน ϕ 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร.....	58
5.38 เปรียบเทียบค่า c ระหว่างทั้งสองห้องผสม.....	59
5.39 ความดันลดจากแรงเสียดทาน ระหว่างทั้งสองห้องผสม.....	60
5.40 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Owen.....	62
5.41 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Owen.....	62
5.42 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.53 มิลลิเมตร โดย Owen.....	62
5.43 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย McAdams และคณะ.....	63
5.44 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย McAdams และคณะ.....	63
5.45 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.53 มิลลิเมตร โดย McAdams และคณะ.....	63
5.46 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Cicchitti และคณะ.....	64
5.47 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Cicchitti และคณะ.....	64
5.48 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.53 มิลลิเมตร โดย Cicchitti และคณะ.....	64
5.49 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Lin และคณะ.....	65
5.50 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Lin และคณะ.....	65
5.51 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.53 มิลลิเมตร โดย Lin และคณะ.....	65
5.52 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Beattie และ Whalley.....	66
5.53 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Beattie และ Whalley.....	66
5.54 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.53 มิลลิเมตร โดย Beattie และ Whalley.....	66
5.55 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim.....	67
5.56 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim.....	67
5.57 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.53 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim.....	67
5.58 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Dukler และคณะ.....	68
5.59 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Dukler และคณะ.....	68
5.60 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.53 มิลลิเมตร โดย Dukler และคณะ.....	68
5.61 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย English และ Kandlika.....	70
5.62 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Kawahara และคณะ.....	71
5.63 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim.....	71
5.64 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.15 มิลลิเมตร โดย Venkatesan และ คณะ.....	71
5.65 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย English และ Kandlika.....	72
5.66 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Kawahara และคณะ.....	72
5.67 ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.68	ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Venkatesan และ คณะ.....73
5.69	ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย English และ Kandlika.....73
5.70	ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Kawahara และคณะ.....74
5.71	ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim.....74
5.72	ข้อมูลการทดลองกับการทำนาย ϕ 0.22 มิลลิเมตร โดย Venkatesan และ คณะ.....74
1	การตรวจสอบระบบของน้ำ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....87
2	การตรวจสอบระบบของน้ำ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....88
3	การตรวจสอบระบบของน้ำ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....90
4	การตรวจสอบระบบของน้ำ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....91
5	การตรวจสอบระบบของน้ำ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....93
6	การตรวจสอบระบบของน้ำ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....94
7	การตรวจสอบระบบของอากาศ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....100
8	การตรวจสอบระบบของอากาศ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.15 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....101
9	การตรวจสอบระบบของอากาศ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....103
10	การตรวจสอบระบบของอากาศ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.22 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....104
11	การตรวจสอบระบบของอากาศ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Cross-junction.....106
12	การตรวจสอบระบบของอากาศ ท่อไมโครแชนเนล ϕ 0.53 มิลลิเมตร ของ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet.....107

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมายสัญลักษณ์
A	พื้นที่หน้าตัด, m^2
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, m
J_G	ความเร็วพื้นผิวของอากาศ, m/s
J_L	ความเร็วพื้นผิวของน้ำ, m/s
Q_{air}	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, m^3/s
Q_{water}	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, m^3/s
t	เวลา, s
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
ρ_{water}	ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m^3
ρ_g	ความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว, kg/m^3
We	เวเบอร์นัมเบอร์ (Weber number)
Bo	บอร์นัมเบอร์ (Bond number)
μ	ความหนืดแบบไดนามิก (Dynamic viscosity), Ns/m^2
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)
G	ฟลักซ์มวล (Mass flux), kg/m^2s
σ	แรงตึงผิว (surface tension), N/m
α	สัดส่วนช่องว่าง
β	คุณภาพไอเชิงปริมาตร
ϕ_L^2	two-phase friction multiplier สำหรับการไหลของน้ำเพียงอย่างเดียว
χ	พารามิเตอร์ของ Lockhart–Martinelli
c	ค่าคงที่ของ Chisholm

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

การศึกษาการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศ ภายในท่อไมโครแชนเนลถูกดำเนินการศึกษาอย่างแพร่หลายโดยนักวิจัยหลายท่าน เนื่องมาจากการพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็ก (Compact heat exchanger), ระบบระบายความร้อน สำหรับคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เป็นต้น จะต้องออกแบบระบบให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ การหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด มีการทำงานด้วยประสิทธิภาพที่สูง และไม่มีความดันลดยมากเกินไปล้วนแต่ต้องอาศัยข้อมูลและความเข้าใจในระบบที่มีการไหลแบบสองสถานะ มีนักวิจัยหลายท่านพยายามเสนอหลักเกณฑ์การระบุขนาดของท่อไมโครแชนเนลไว้พอสมควร โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น

- Mehendale และ คณะ (2000) ได้เสนอหลักเกณฑ์ต่อไปนี้

Micro-heat exchanger: $1 \mu\text{m} \leq D_h \leq 100 \mu\text{m}$

Meso-heat exchanger: $100 \mu\text{m} \leq D_h \leq 1\text{mm}$

Compact heat exchanger: $1\text{mm} \leq D_h \leq 6\text{mm}$

Conventional heat exchanger: $D_h > 6\text{mm}$

- Kandlikar (2002) ได้เสนอหลักเกณฑ์ต่อไปนี้

Micro-channel: $10 \mu\text{m} \leq D_h \leq 200 \mu\text{m}$

Mini-channel: $200 \mu\text{m} \leq D_h \leq 3\text{mm}$

Conventional channel: $D_h > 3\text{mm}$

- Tibirica และ Ribatski (2010) สรุปว่าการทดลองสำหรับ flow boiling ที่ใช้สารทำความเย็น halocarbon และไหลในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.3 มิลลิเมตร ถือว่าเป็นจุดแบ่งระหว่างท่อปกติและท่อไมโครแชนเนล

- Harirchian และ Garimella (2010) เสนอเกณฑ์ในการแบ่งว่าจะเป็นท่อไมโครแชนเนล เมื่อ $Bo^{0.5} \times Re_L$ จะมีค่าต่ำกว่า 160 (Bo คือ bond number)

แม้ว่าจะมีหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ถูกนำเสนอออกมา แต่ก็ยังไม่มีข้อยุติที่ชัดเจนว่า ท่อไมโครแชนเนล ควรจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่แน่นอนเท่าใด

เพื่อให้ได้หลักเกณฑ์ที่ชัดเจนสำหรับท่อไมโครแชนเนล การศึกษาวิจัยต่อยอดเพิ่มเติมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากยังมีข้อมูลรูปแบบการไหลภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลขึ้นในแนวตั้งอยู่น้อย ดังนั้นจึงควรมีการทำความเข้าใจและศึกษารูปแบบการไหลภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลในแนวตั้งมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษารูปแบบการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศในท่อไมโครแชนเนลโดยการถ่ายภาพดูรูปแบบและลักษณะการไหล

2. เพื่อศึกษารูปแบบการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศในท่อไมโครแชนเนลโดยการถ่ายภาพดูรูปแบบและลักษณะการไหล
3. เพื่อสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหล (Flow pattern map) สำหรับการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลขึ้นในแนวตั้ง
4. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสัดส่วนช่องว่างของน้ำและอากาศของท่อไมโครแชนเนลซึ่งวางตัวแนวตั้ง
5. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของความดันลดของน้ำและอากาศในท่อไมโครแชนเนลแนวตั้ง
6. เพื่อศึกษาผลกระทบของห้องผสมที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สารทำงาน คือ น้ำ และ อากาศ
2. ท่อทดสอบที่ใช้ทำจากฟิวส์ซิลิกา(Fuse silica) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง คือ 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร
3. ท่อถูกวางในแนวตั้งโดยสารทำงานไหลขึ้น
4. ห้องผสมที่ใช้ทดสอบมี 2 ชนิด คือ Cross-junction และ Y-junction with reducer inlet

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้สามารถเข้าใจรูปแบบการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลขึ้นในแนวตั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร ในห้องผสมทั้ง 2 ชนิด
2. สามารถสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหล ของการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศในท่อไมโครแชนเนลที่วางในแนวตั้งได้
3. ทำให้สามารถเข้าใจสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร ในห้องผสมทั้ง 2 ชนิด
4. ทำให้สามารถเข้าใจความดันลดของการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร ในห้องผสมทั้ง 2 ชนิด
5. ทำให้ทราบผลกระทบของห้องผสมที่แตกต่างกันที่มีต่อคุณลักษณะการไหลของท่อไมโครแชนเนลในแนวตั้ง

บทที่ 2

สำรวจเอกสาร

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Triplett และคณะ (1999a,1999b) ทำงานวิจัยเรื่องการไหลสองสถานะของอากาศและน้ำภายในท่อไมโครแชนเนล(Gas-liquid two-phase flow in micro-channels) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่าง และความดันลด โดยใช้อากาศและน้ำเป็นสารทำงานที่ไหลผ่านชุดทดลองซึ่งทำจากอะคริลิก(Acrylic) และโพลีคาร์บอเนต(Polycarbonate)ซึ่งชุดทดลองเป็นท่อซึ่งมีหน้าตัดกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในสองขนาดด้วยกันคือ 1.1 และ 1.45 มิลลิเมตร และท่อแบบกึ่งสามเหลี่ยมมีไฮดรอลิกไดมิเตอร์ 1.09 และ 1.49 มิลลิเมตร มีความยาว 200 มิลลิเมตร มีลักษณะการวางท่อในแนวราบ มีการนำเสนอความดันลดสองสถานะของแต่ละรูปแบบการไหล

Kawahara และคณะ (2002) ได้ทำการทดลองการไหลสองสถานะ ภายในท่อซึ่งมีหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ยาว 64.5 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวนอน โดยใช้ไนโตรเจนและน้ำเป็นสารทำงาน ความเร็วของอากาศและน้ำอยู่ในช่วง 0.1 – 60 เมตรต่อวินาที และ 0.02 – 4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยทำการศึกษาถึงรูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่าง (Void fractions) และค่าความดันลด รูปแบบการไหลที่พบ ประกอบด้วย slug-ring flow(thin liquid film > ring liquid film), ring-slug flow(ring liquid film > thin liquid film), semi-annular flow(เกิดสลับกันระหว่าง liquid aloneและring liquid film), multiple flow (มีทั้งหมดห้ารูปแบบการไหล liquid alone, thin liquid film, ring liquid film, thick liquid film, deformed interface)

Kawaji และคณะ (2009) ศึกษาผลกระทบของรูปทรงmixing chamberของการไหลสองสถานะของ DI-water และไนโตรเจน ใช้ท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวนอน รูปแบบการไหลที่พบ ประกอบด้วย bubbly flow, plug flow, slug flow, semi-annular flow จากการเปรียบเทียบทำให้ทราบว่าผลของรูปทรง mixing chamber ที่มีต่อรูปแบบการไหล void fraction และpressure drop มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

Saisorn และ Wongwises (2010) ได้ศึกษามูลของขนาดท่อที่มีผลต่อรูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่าง และความดันลด ของการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศ โดยใช้ท่อพีวีซีซิลิกาซึ่งวางตัวในแนวนอน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22, 0.53 มิลลิเมตรโดยมีความยาว 104, 120, 320 มิลลิเมตรตามลำดับ ในการทดลองใช้ความเร็วของอากาศ ในช่วง 0.37 - 42.36 เมตรต่อวินาที ความเร็วของน้ำ ในช่วง 0.005 - 3.04 เมตรต่อวินาที รูปแบบการไหลที่พบ คือ slug flow, throat-annular flow, churn flow, annular-rivulet flow, annular flow, liquid/unstable annular alternating flow, liquid/annular alternating flow

Saisorn และ Wongwises (2011) ใช้ท่อทำจากซิลิกาผสมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง คือ 0.53 มิลลิเมตร และ 0.15 มิลลิเมตร ที่ใช้ในการทดสอบสัดส่วนช่องว่าง ข้อมูลสำหรับท่อทั้งสองจะได้รับโดยการวิเคราะห์ภาพ สำหรับท่อขนาดใหญ่สัดส่วนช่องว่างพบว่าเป็นเชิงเส้น

Venkatesan และคณะ (2011) ศึกษาผลของขนาดท่อซึ่งมีหน้าตัดกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6, 1.2, 1.7, 2.6, 3.4 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวนอนโดยใช้น้ำและอากาศ ในการ

ทดลอง ใช้ความเร็วของอากาศ ในช่วง 0.01 – 50 เมตรต่อวินาที ความเร็วของน้ำ ในช่วง 0.01 – 3 เมตรต่อวินาที รูปแบบการไหลที่พบในทุกท่อ คือ bubbly flow, slug flow, slug-annular flow และ dispersed bubbly flow สำหรับท่อขนาด 2.6 มิลลิเมตร จะพบ wavy annular flow, stratified flow

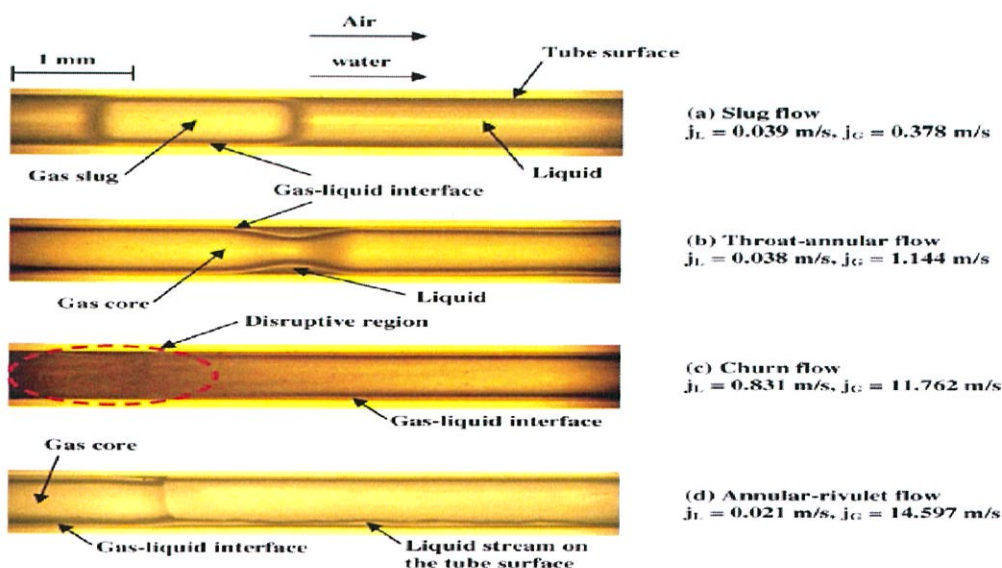
Choi และคณะ (2011) ศึกษาผลกระทบอัตราส่วนภาพ(Asspect ratio)ของการไหลสองสถานะในท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยมบนรูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่าง และความดันลด โดยท่อมีไฮดรอลิกไดมิเตอร์ 0.49, 0.49, 0.32, 0.14 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนภาพ 0.92, 0.67, 0.47, 0.16 มิลลิเมตร สารทำงานคือน้ำและไนโตรเจน รูปแบบการไหลที่พบ ได้แก่ bubbly flow, transitional flow(Multiple flow) และ liquid ring flow สัดส่วนช่องว่างเป็นเชิงเส้นกับคุณภาพไอเชิงปริมาตร

Sur และ Liu (2012) ศึกษาผลกระทบของขนาดท่อบนรูปแบบการไหลสองสถานะในท่อไมโครแชนแนลกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1, 0.18 และ 0.32 มิลลิเมตร รูปแบบการไหลที่พบ ได้แก่ bubbly flow, slug flow, ring flow และ annular flow

Zequai และคณะ (2013) ดำเนินการศึกษาทดลองเพื่อวิเคราะห์การไหลสองสถานะอากาศ-น้ำ ในท่อที่วางตัวในแนวนอนสำหรับการไหลแบบราบเรียบ ท่อในการทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ความเร็วของอากาศและน้ำอยู่ในช่วง 0.0023 - 3.54 เมตรต่อวินาที และ 0.0078 - 0.0079 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ รูปแบบการไหลที่พบ คือ bubbly flow, slug flow และ annular flow

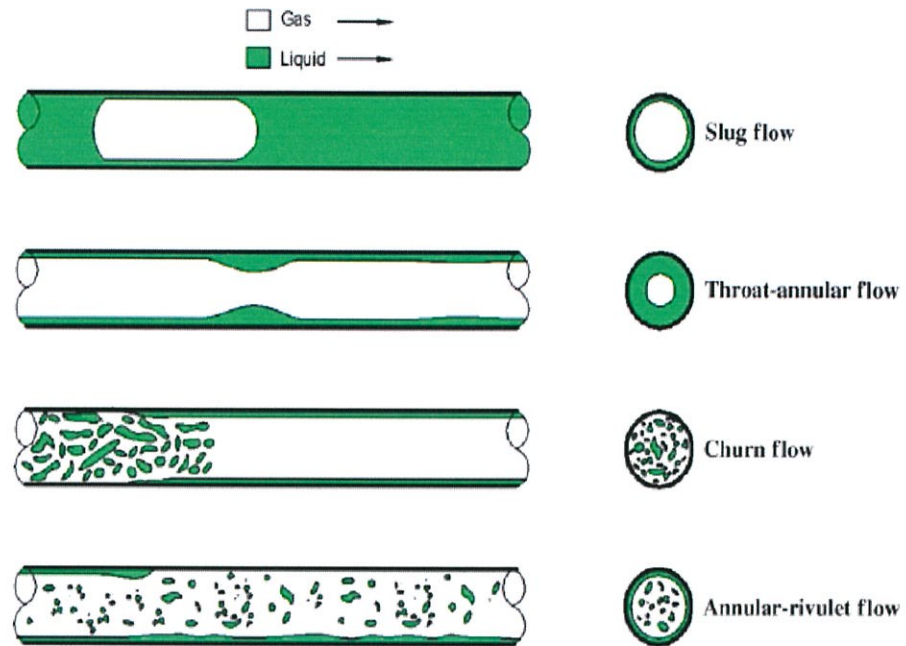
Xing และคณะ (2014) ศึกษาผลกระทบความสัมพันธ์ของสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะน้ำและอากาศในท่อซึ่งมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งวางตัวในแนวตั้ง ผลการวิจัยพบว่าผลกระทบของสัดส่วนช่องว่างที่มีต่อแรงโน้มถ่วงจะพบในรูปแบบการไหลแบบ slug flow churn flow และ annular flow แต่แทบจะไม่มีผลกระทบของสัดส่วนช่องว่างที่มีต่อแรงโน้มถ่วงในรูปแบบการไหลแบบ bubbly flow

ในทศวรรษที่ผ่านมา มีบทความตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับไมโครแชนแนลค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลของท่อสำหรับขนาดปกติ การทบทวนเอกสารแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของห้องผสมที่มีต่อการไหลสองสถานะในท่อขนาดเล็กยังคงขาดข้อมูลอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในท่อซึ่งวางตัวในแนวตั้ง

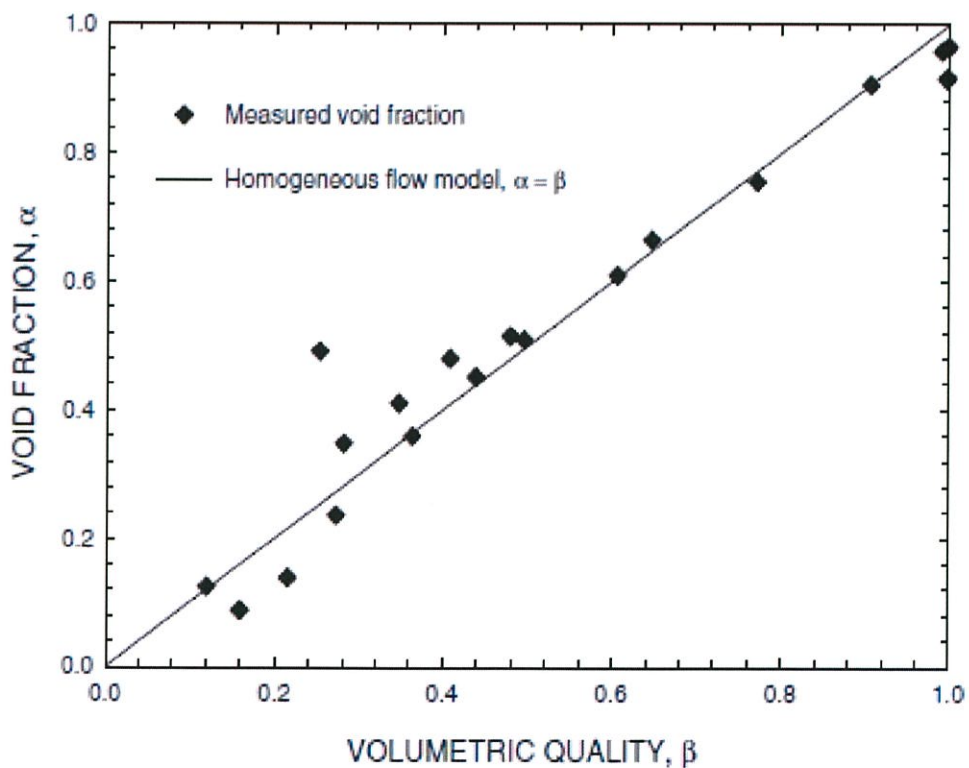


รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร Saisorn และ Wongwises (2008)

ในรูปที่ 2.1-2.2 เป็นตัวอย่างรูปแบบการไหลที่จะพบในท่อไมโครแชนแนลโดยงานนี้จะ เป็นของ Saisorn และ Wongwises (2008) ซึ่งรูปแบบการไหลที่จะพบในท่อไมโครแชนแนลเท่านั้น คือ รูปแบบการไหลแบบ throat-annular flow

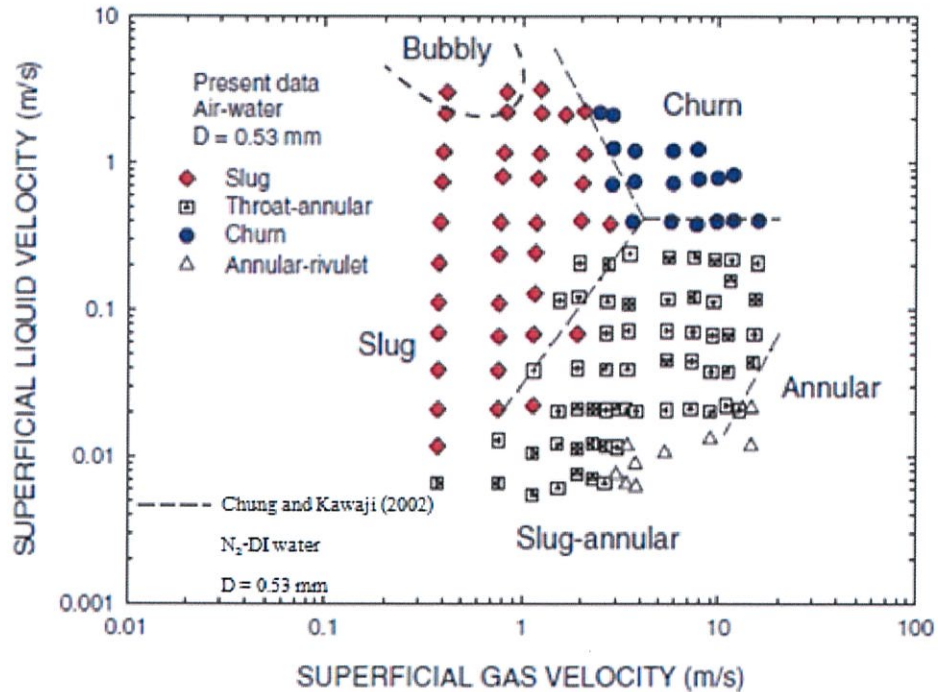


รูปที่ 2.2 ภาพสเก็ตรูปแบบการไหล Saisorn และ Wongwises (2008)



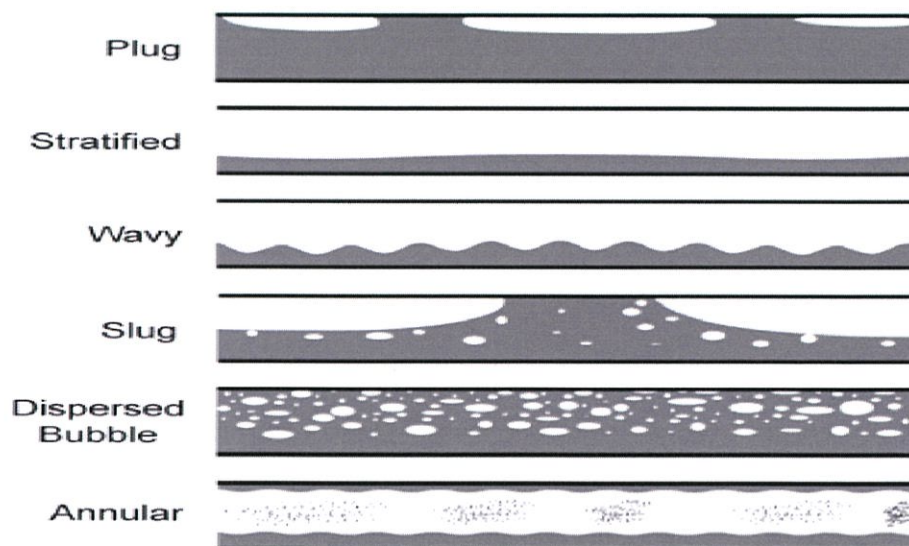
รูปที่ 2.3 แผนภูมิระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับคุณภาพไอเชิงปริมาตร Saisorn และ Wongwises (2008)

Homogeneous flow model คือ ความเร็วของแก๊สและความเร็วของของเหลวมีความเร็วที่ใกล้เคียงหรือเท่ากัน จากรูปที่ 2.3 พบว่าสัดส่วนช่องว่างที่สอดคล้องกับ homogeneous flow model

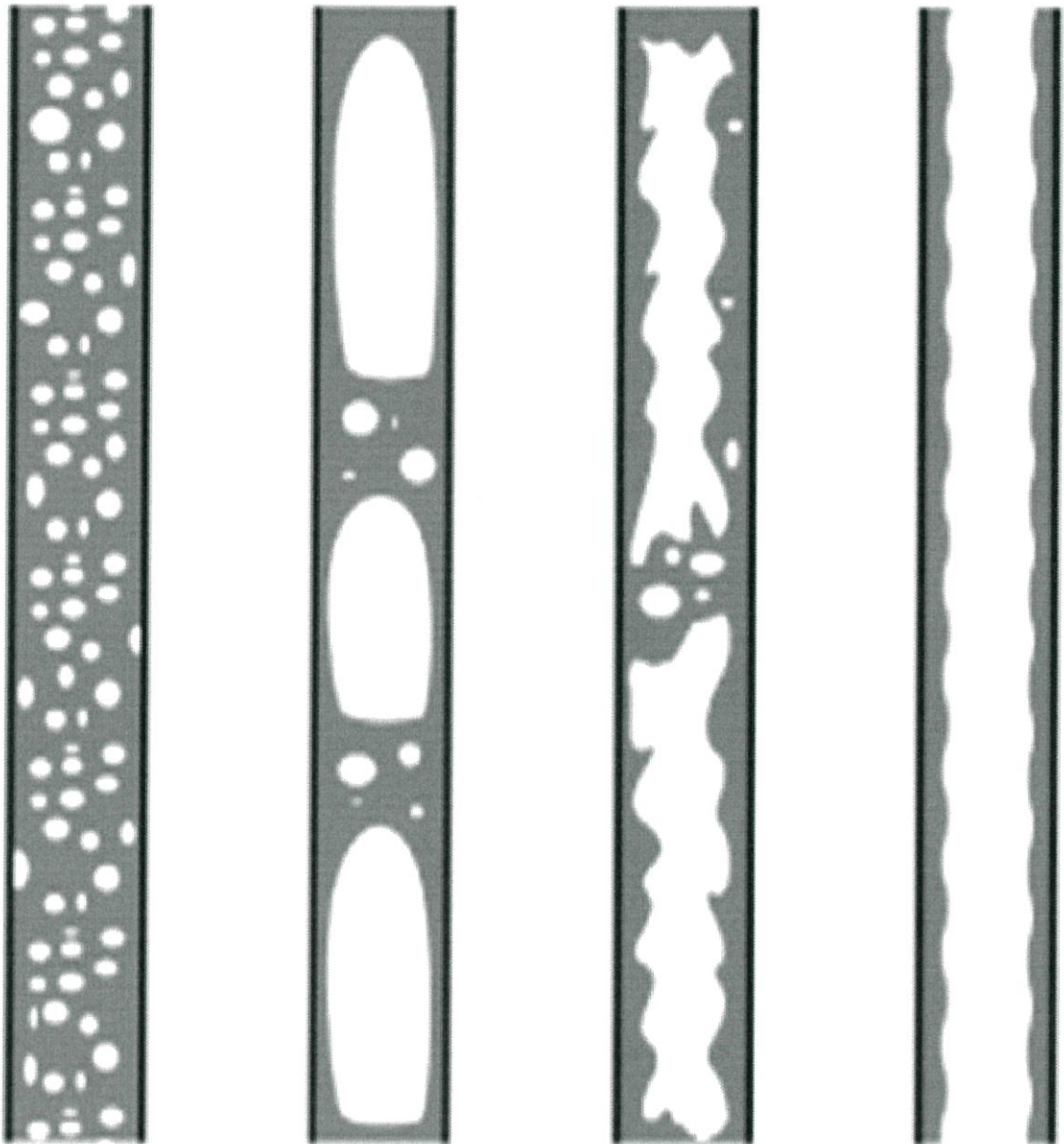


รูปที่ 2.4 รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร Saisorn และ Wongwises (2008)

แผนภูมิรูปแบบการไหลจะมีเป็นกราฟที่ใช้สำหรับพล็อตข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ในแกนแนวนอนจะเป็นค่าของความเร็วของแก๊ส และในแกนแนวตั้งจะเป็นค่าความเร็วของของเหลว ในส่วนของจุดต่างๆที่อยู่ในกราฟ คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง และในส่วนของเส้นประที่อยู่ในกราฟ คือ เส้นแบ่งขอบเขตของนักวิจัยอื่นๆ นำมาเปรียบเทียบเพื่อดูความสอดคล้องของข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 แสดงรูปการไหลที่เกิดขึ้นในท่อแนวนอน Scientific Electronic Library Online (2012)



รูปที่ 2.6 แสดงรูปการไหลที่เกิดขึ้นในท่อแวนดิง Scientific Electronic Library Online (2012)

ในการศึกษาแบบการไหลจะมีการวางตัวของท่อที่แตกต่างกัน เช่น การวางตัวของท่อในแนวนอนและในแนวตั้ง การวางตัวของท่อที่แตกต่างกันก่อให้เกิดรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5-2.6 ความแตกต่างนี้เป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงเข้ามาเกี่ยวข้อง

บทที่ 3 หลักการและพื้นฐานทางวิชาการ

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

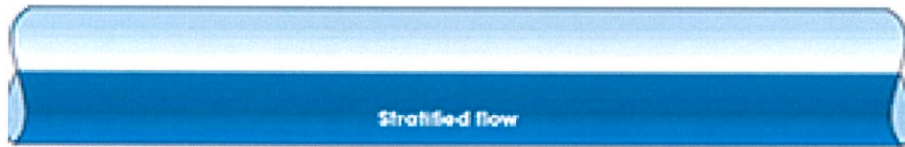
รูปแบบการไหลสองสถานะที่มักพบเห็นในท่อขนาดปกติ มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 Bubbly flow, IHS GlobalSpec (2011)



รูปที่ 3.2 Plug flow, IHS GlobalSpec (2011)



รูปที่ 3.3 Stratified flow , IHS GlobalSpec (2011)



รูปที่ 3.4 Wavy flow, IHS GlobalSpec (2011)



รูปที่ 3.5 Slug flow, IHS GlobalSpec (2011)



รูปที่ 3.6 Annular flow, IHS GlobalSpec (2011)

Bubbly Flow (รูปที่ 3.1) มีลักษณะการไหลเป็นฟองแก๊สขนาดเล็กไหลอยู่ค่อนไปทางส่วนบนของท่อเนื่องจากฟองก๊าซมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวจึงลอยตัวขึ้น

Plug Flow (รูปที่ 3.2) เกิดจากการรวมตัวกันของฟองแก๊สขนาดเล็กหลายๆลูกของ Bubbly flow ทำให้เกิดเป็นฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่และยาวขึ้น

Stratified Flow (รูปที่ 3.3) มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยก๊าซจะอยู่บน และของเหลว อยู่ล่าง โดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะราบเรียบ

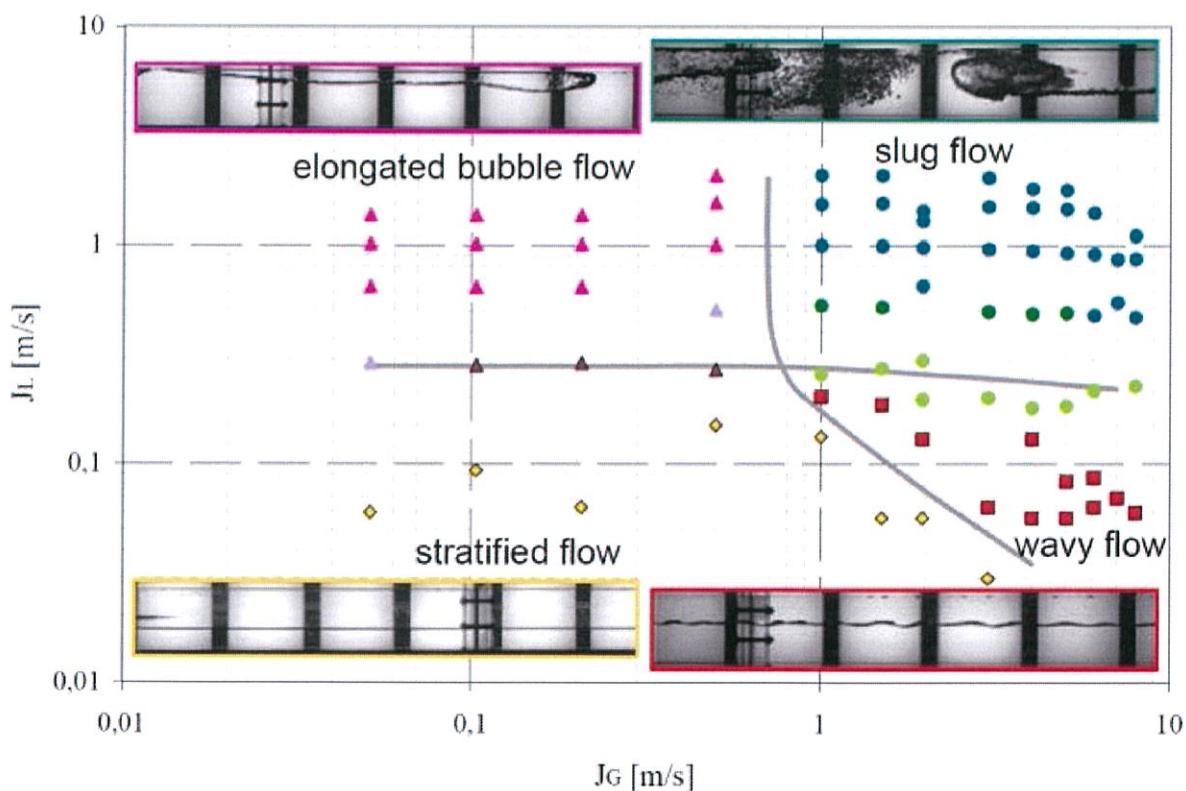
Wavy Flow (รูปที่ 3.4) มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยแก๊สจะอยู่บน และของเหลว จะอยู่ล่าง โดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะเป็นคลื่น

Slug Flow (รูปที่ 3.5) เกิดเมื่อคลื่นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นของแก๊สและของเหลวใน Wavy flow เกิดสูงขึ้นจนยอดคลื่นถึงผนังด้านบนของท่อ

Annular Flow (รูปที่ 3.6) เป็นลักษณะของเหลวไหลเป็นชั้นฟิล์มบางแหวนรอบผนังท่อ โดยความหนาของชั้นฟิล์มของของเหลวด้านล่างจะหนากว่าชั้นบน และอาจมีละอองของของเหลวเคลื่อนที่กระจาย อยู่ในแก๊สซึ่งเคลื่อนที่อยู่บริเวณแกนกลางของท่อ

3.2 แผนภูมิแสดงรูปแบบการไหล

แผนภูมिरูปแบบการไหลถูกสร้างขึ้นมาจากข้อมูลที่ได้จากการสังเกตรูปแบบการไหลผ่านการทำให้มองเห็นการไหล (Flow visualization) และถูกนำเสนอในเทอมของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น รูปที่ 3.7 เป็นแผนภูมิแสดงรูปแบบการไหลซึ่งถูกนำเสนอในเทอมของความเร็วของอากาศ (Gas superficial velocity, j_G) และความเร็วของน้ำ (Liquid superficial velocity, j_L)

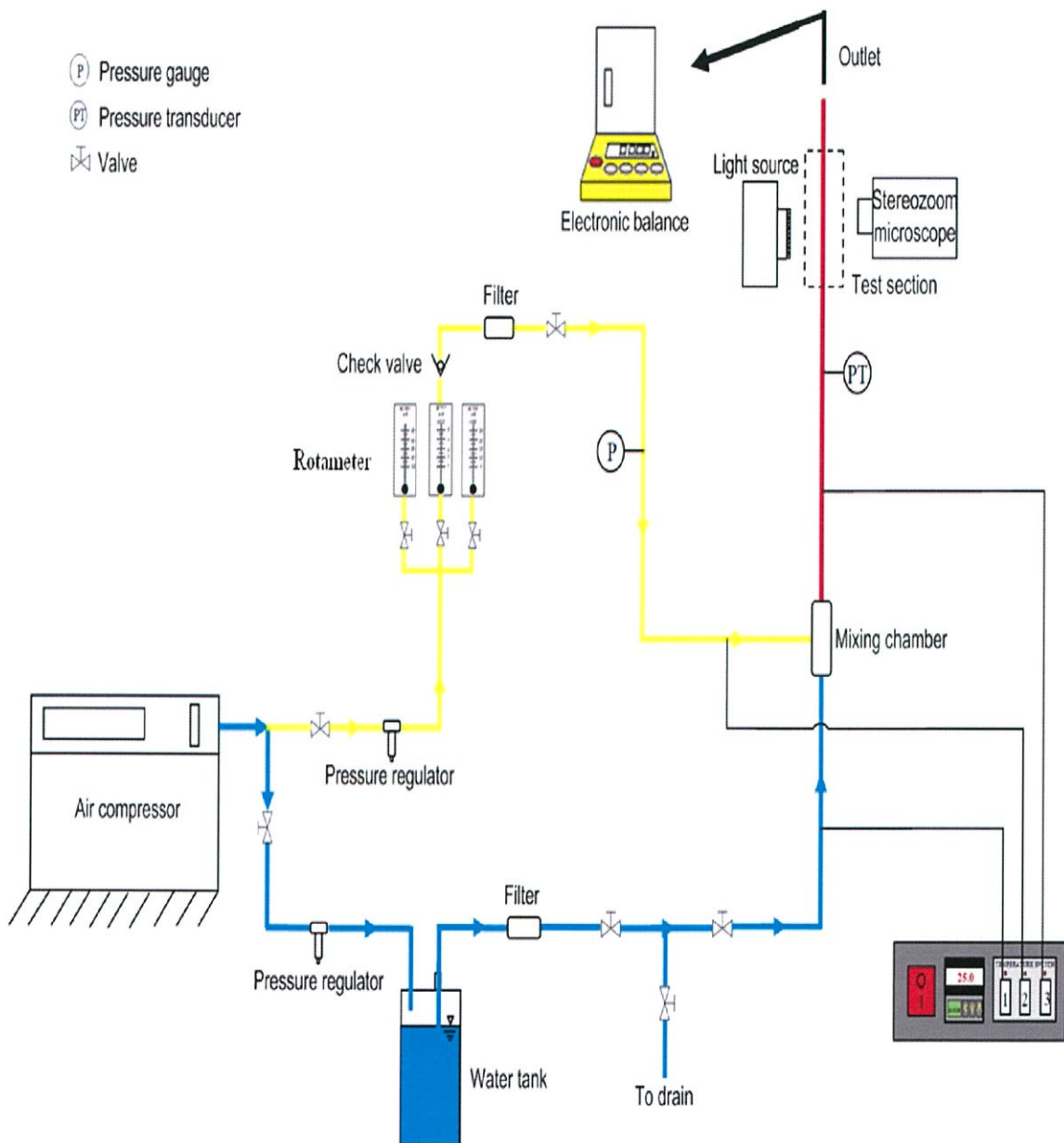


รูปที่ 3.7 แผนภูมिरูปแบบการไหล, IHS GlobalSpec (2011)

บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองบางอย่างมีความละเอียดอ่อนในการใช้งาน หากใช้ไม่ถูกต้องอาจทำให้เสียหายได้ง่ายมาก ดังนั้นจึงควรศึกษาคู่มือของอุปกรณ์แต่ละชิ้นให้ละเอียด ก่อนทำการทดลองเพื่อไม่ให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายจากการใช้งานไม่ถูกประเภท



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมของระบบ

อากาศที่ไหลออกจากปั๊มลม (Air compressor) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ที่วาล์วแยก 2 ทาง อากาศส่วนหนึ่งจะไหลผ่านตัวควบคุมความดัน (Pressure regulator) เข้าถังเก็บน้ำ (Water tank) ไปดันน้ำในถังเก็บน้ำ ให้ไหลผ่านตัวกรอง (Filter) เพื่อกรองสิ่งสกปรกต่างๆก่อนไหลเข้าห้องผสม และ อากาศอีกส่วนหนึ่งที่ถูกแยกออกที่วาล์ว แยก 2 ทาง จะไหลผ่านตัวควบคุมความดันเพื่อปรับความดันให้คงที่ก่อนไหลเข้าตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ (Rotameter) ที่ตัวปรับอัตราการไหลของอากาศนี้เราจะใช้ปรับค่าความเร็วของอากาศก่อนเข้าไปผสมกับน้ำที่ห้องผสม ซึ่งก่อนที่ของผสมนี้ไหลเข้าท่อไมโครแซนเนลเราทำการติดตั้งตัววัดความดัน (Pressure tab) เพื่อที่จะอ่านค่าความดันและอุณหภูมิจากตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducer) และจอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Temperature digital display) ตามลำดับ เมื่อไหลผ่านตัววัดความดันจะไหลเข้าท่อไมโครแซนเนลและไหลออกสู่บรรยากาศ ซึ่งส่วนปลายของท่อไมโครแซนเนล ทำการลอกโพลีอิมายด์ (Polyimide) ออกเพื่อทำให้ภาพที่ถ่ายออกมาชัดเจนขึ้น โดยในการถ่ายภาพเราจะติดตั้งสปอร์ตไลท์ (Halogen lamp) และอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ เพื่อสังเกตรูปแบบการไหลภายในท่อไมโครแซนเนล

4.1.1 รายละเอียดส่วนประกอบ

เครื่องมือสำหรับการทดลองมีอุปกรณ์และส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. ท่อแก้วทนความดัน เรียกท่อนี้ว่าท่อไมโครแซนเนล ทำมาจากพิวส์ซิลิกา ที่เคลือบโพลีอิมายด์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับท่อ แต่ในการทดลองเราจำเป็นต้องล้างเอาโพลีอิมายด์ออก เพื่อถ่ายภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งท่อนี้เป็นส่วนสำคัญมากในการทดลอง ท่อแก้วทนความดันนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในมากมายหลายขนาด ซึ่งขนาดที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ 0.53, 0.22 และ 0.15 มิลลิเมตร
2. ชุดรองรับท่อแก้วทนความดัน มีไว้เพื่อเป็นฐานรองรับส่วนการทดสอบเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ทดสอบเกิดการเสียหายได้ง่าย
3. ถังเก็บน้ำใช้สำหรับบรรจุน้ำ เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งถังเก็บน้ำทำมาจากสแตนเลส เพื่อป้องกันการเกิดสนิมซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการทดลองได้ และมีฝาสำหรับเปิด-ปิด เพื่อสะดวกในการทำความสะอาดถังเก็บน้ำ
4. ห้องผสมทำหน้าที่ในการผสมน้ำและอากาศ เข้าด้วยกันก่อนที่จะไหลเข้าท่อไมโครแซนเนลซึ่งห้องผสมที่ดี จะต้องสามารถพาของไหลให้ไหลผ่านท่อไมโครแซนเนลได้อย่าง นุ่มนวลและไม่มีการไหลย้อนกลับ โดยขนาดปริมาตรและรูปร่างของห้องผสมจะมีผลอย่างมากต่อการไหลภายในระบบ
5. ท่อสายยางทนแรงดัน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ใช้งานเกี่ยวกับระบบน้ำและกับระบบอากาศโดยท่ออย่างจะต้องสามารถทนความดันสูงสุดของระบบได้
6. ตัวแปลงสัญญาณความดัน เราจะติดตั้งก่อนที่น้ำและอากาศจะไหลเข้าส่วนการทดสอบเพื่อวัดความดันที่ทางเข้าของท่อไมโครแซนเนล

7. ปัมลมมีหน้าที่เพิ่มแรงดันให้กับระบบ โดยจะเพิ่มแรงดันในถังเก็บน้ำให้ไหลผ่านตัวแปลงสัญญาณความดันและท่อไมโครเซนเนล ขณะเดียวกันจะทำหน้าที่จ่ายแก๊สหรืออากาศเข้าไปยังระบบเพื่อผสมกับของเหลวให้เกิดการไหลสองสถานะก่อนเข้าท่อไมโครเซนเนล
8. ตัวปรับอัตราการไหลของอากาศทำหน้าที่อัดปริมาณอากาศที่เข้าสู่ชุดทดลอง
9. ตัวควบคุมความดัน เราจะติดตั้งก่อนที่สารทำงานจะไหลเข้าตัวปรับอัตราการไหลและถังเก็บน้ำเพื่อควบคุมระดับความดันในระบบ
10. เกจวัดความดัน (Pressure gauge) เราจะติดตั้งเพื่อวัดความดันของอากาศก่อนที่จะไหลไปยังห้องผสม ความดันที่ออกจากวาล์วควบคุมความดันจะถูกแสดงค่าด้วยเกจวัดความดัน
11. ตัวกรอง เราจะติดตั้งไว้หลังจากที่สารทำงานไหลเข้าตัวปรับอัตราการไหลถังเก็บน้ำเพื่อกรองสิ่งสกปรกต่างๆออก
12. จอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิตอล ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิก่อนที่ของไหลจะไหลผ่านตัวปรับอัตราการไหล และวัดอุณหภูมิที่ไหลออกจากตัวปรับอัตราการไหล
13. เครื่องชั่งตวงวัด 3 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของของเหลว หลังจากที่มีของไหลสองสถานะไหลผ่านท่อไมโครเซนเนลออกสู่บรรยากาศ ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นมวลของของเหลวต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะถูกคำนวณเพื่อหาอัตราการไหลที่ไหลผ่านท่อไมโครเซนเนล
14. กล้องถ่ายรูป ในการถ่ายรูปแบบการไหลสองสถานะ ใช้กล้องจุลทรรศน์ (Stereo zoom microscopes) ซึ่งควรมีกำลังขยายไม่น้อยกว่า 60 เท่า ร่วมกับกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงซึ่งมีความเร็วของชัตเตอร์ (Shutter speed) ไม่น้อยกว่า 1/10,000 วินาที

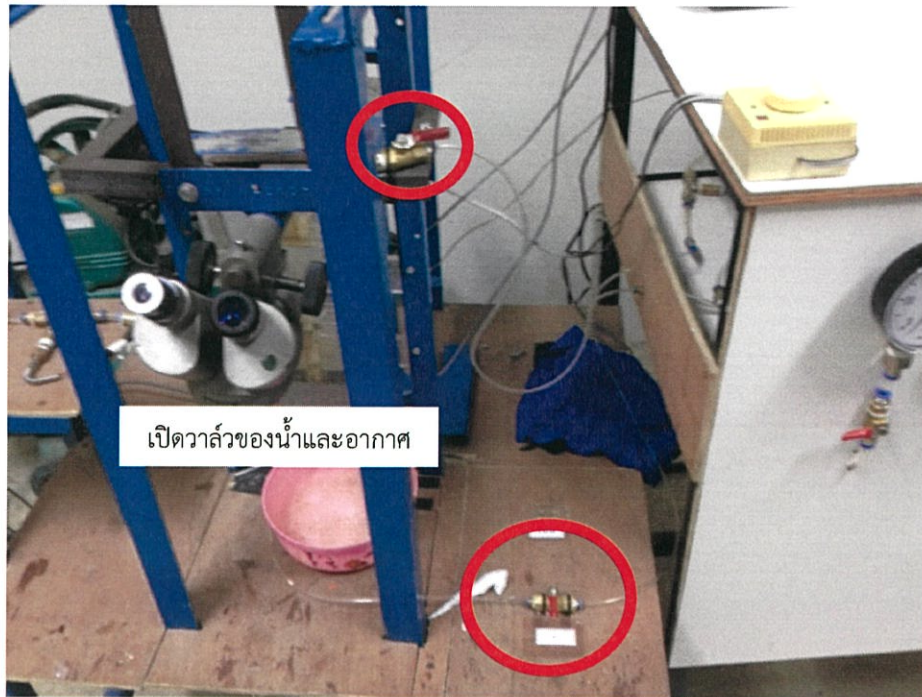
4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ชุดทดลองให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานจากนั้น เปิดวาล์วที่ถังลมเพื่อให้อากาศไหลเข้าระบบ



รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 1

2. เปิดวาล์วของน้ำและอากาศที่ทางเข้าส่วนการทดสอบ



รูปที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 2

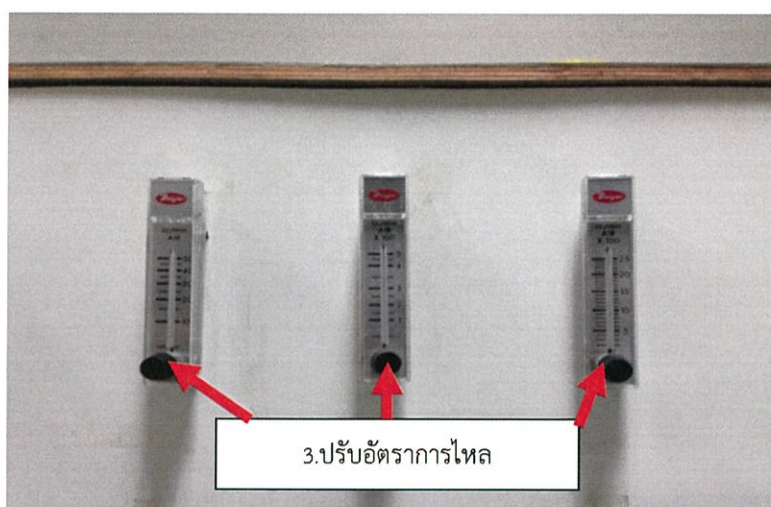
3. เปิดวาล์วแยกลมด้านของระบบอากาศไหลเข้า จากนั้นเปิดวาล์วตัวควบคุมความดันของอากาศ เพื่อให้อากาศไหลเข้าระบบ ต่อจากนั้นปรับอัตราการไหลที่ตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ ให้มีอากาศไหลในท่อเล็กน้อย



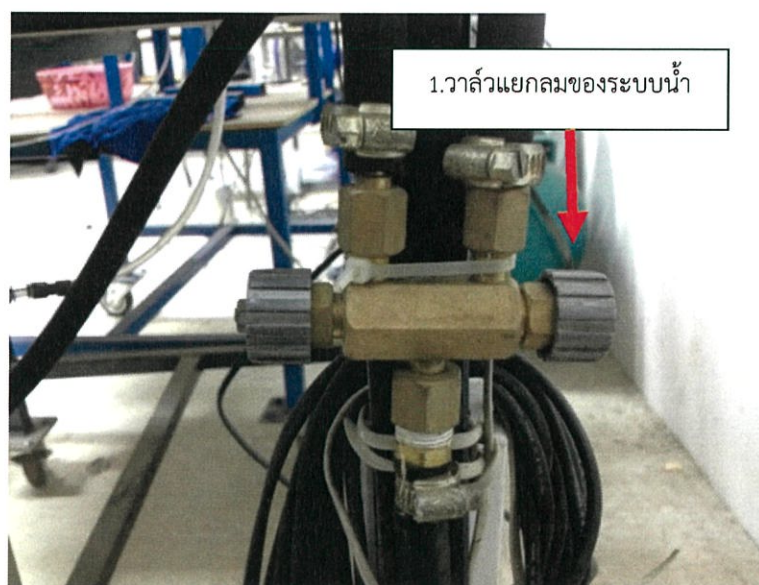
รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3



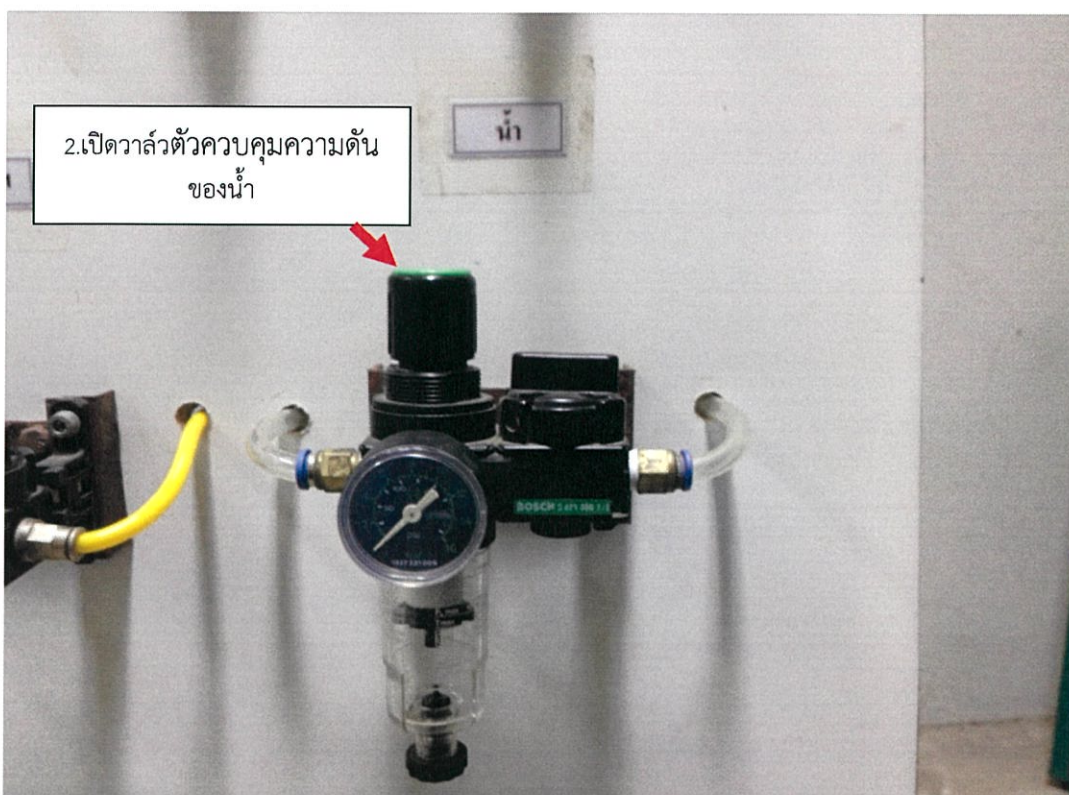
รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.7 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 4



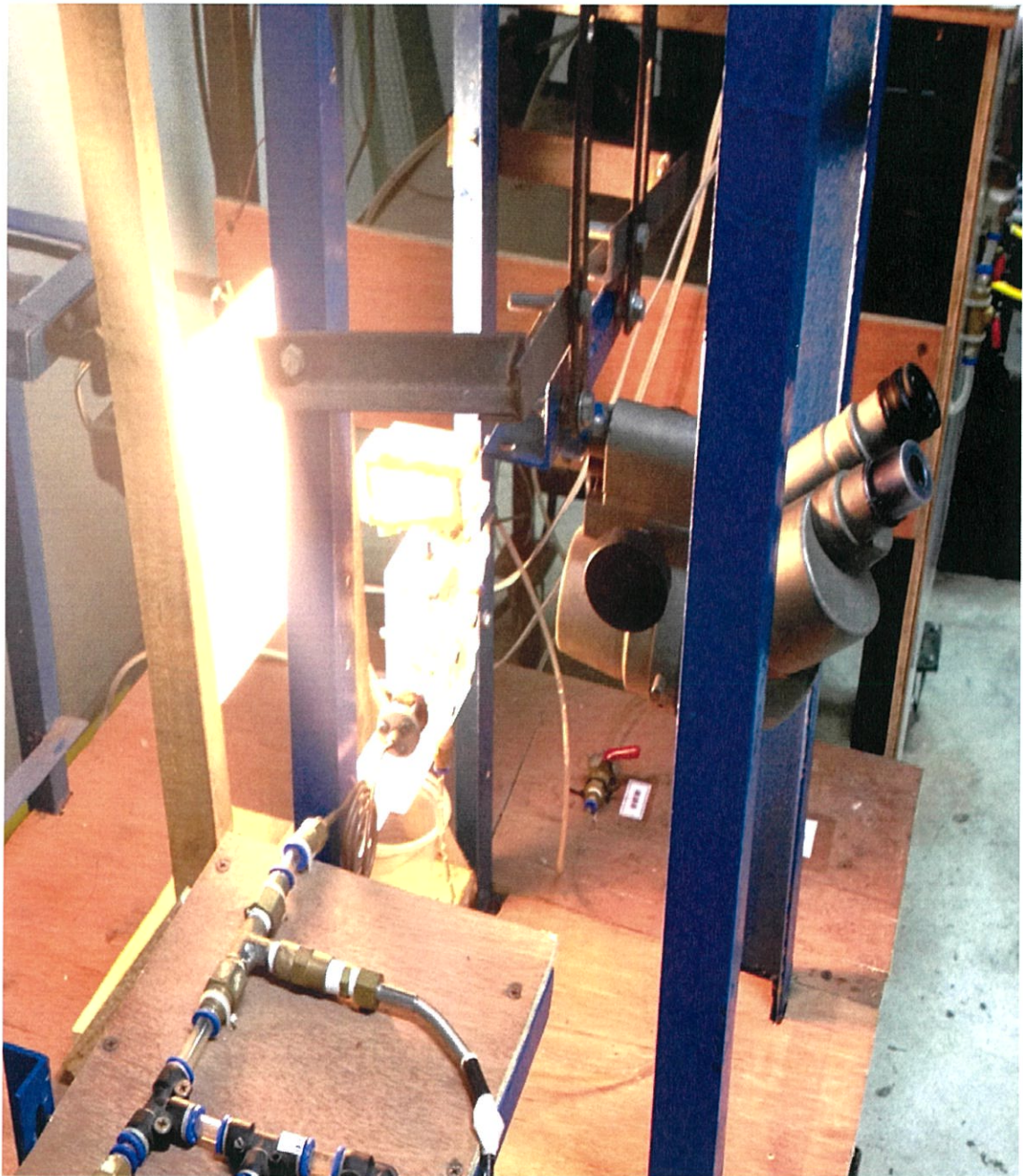
รูปที่ 4.8 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 4

4. เปิดวาล์วของตัวแปลงสัญญาณความดัน ขนาด 0 - 4 บาร์

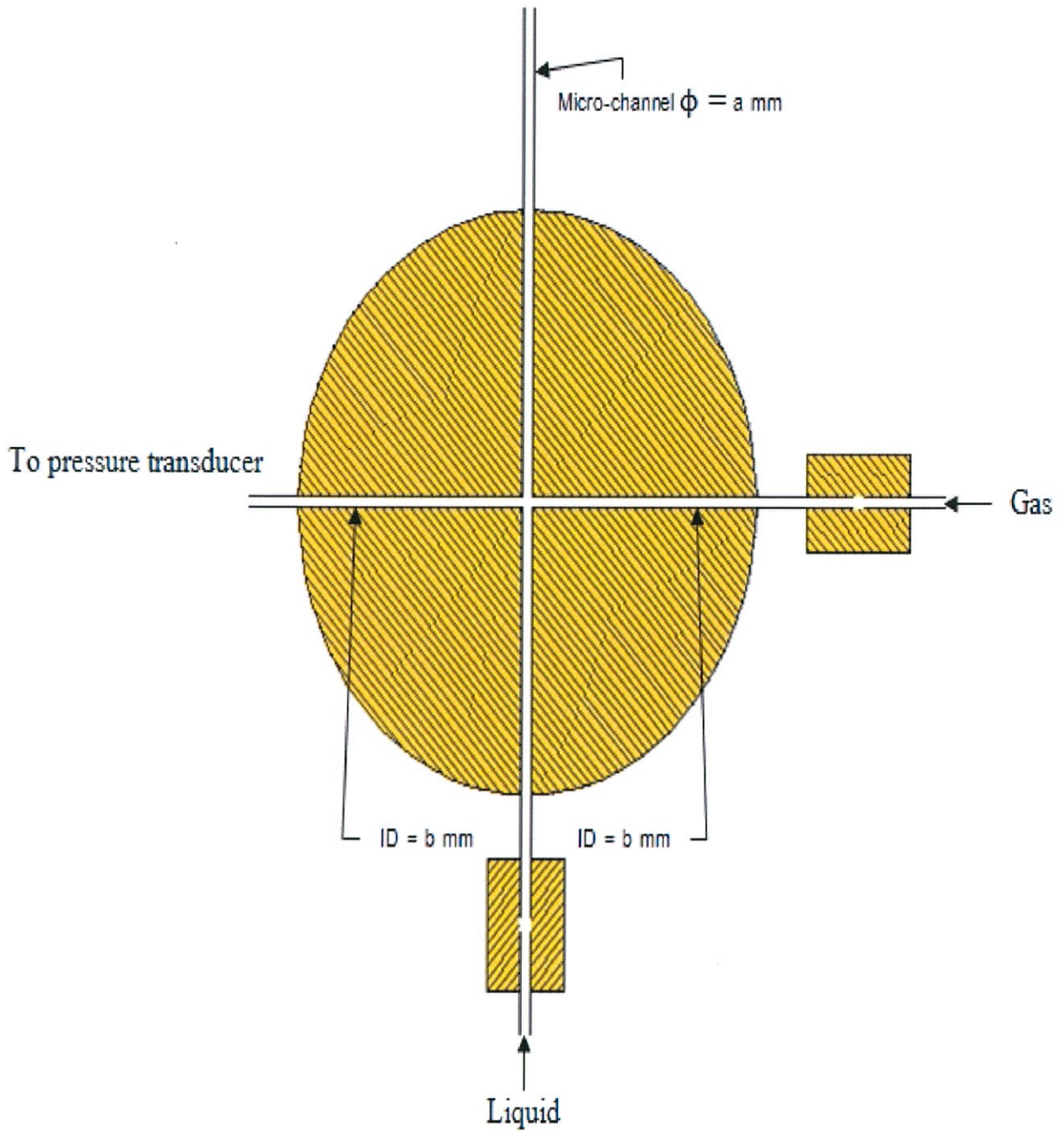


รูปที่ 4.9 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 5

5. ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำโดยให้อัตราการไหลคงที่ตัวแปลงสัญญาณความดันของระบบน้ำ และปรับอัตราการไหลของอากาศให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆที่ตัวปรับอัตราการไหล
6. ปล่อยให้ระบบทำงานจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ และทำการถ่ายภาพ จำนวน 50 ภาพและวิดีโอ 10 วินาที ในหนึ่งเงื่อนไข สังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจากภาพถ่ายและบันทึกผลที่ ความเร็วของอากาศ (Gas superficial velocity) ที่ค่าต่างๆ
7. ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 2 และ 3 ที่ความเร็วของน้ำ(Liquid superficial velocity)ที่ค่าต่างๆ
8. นำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นแผนภูมิรูปแบบการไหล (Flow pattern map) โดยแสดงค่าระหว่างความเร็วของน้ำ และความเร็วของอากาศ



รูปที่ 4.10 แสดงส่วนการทดสอบ

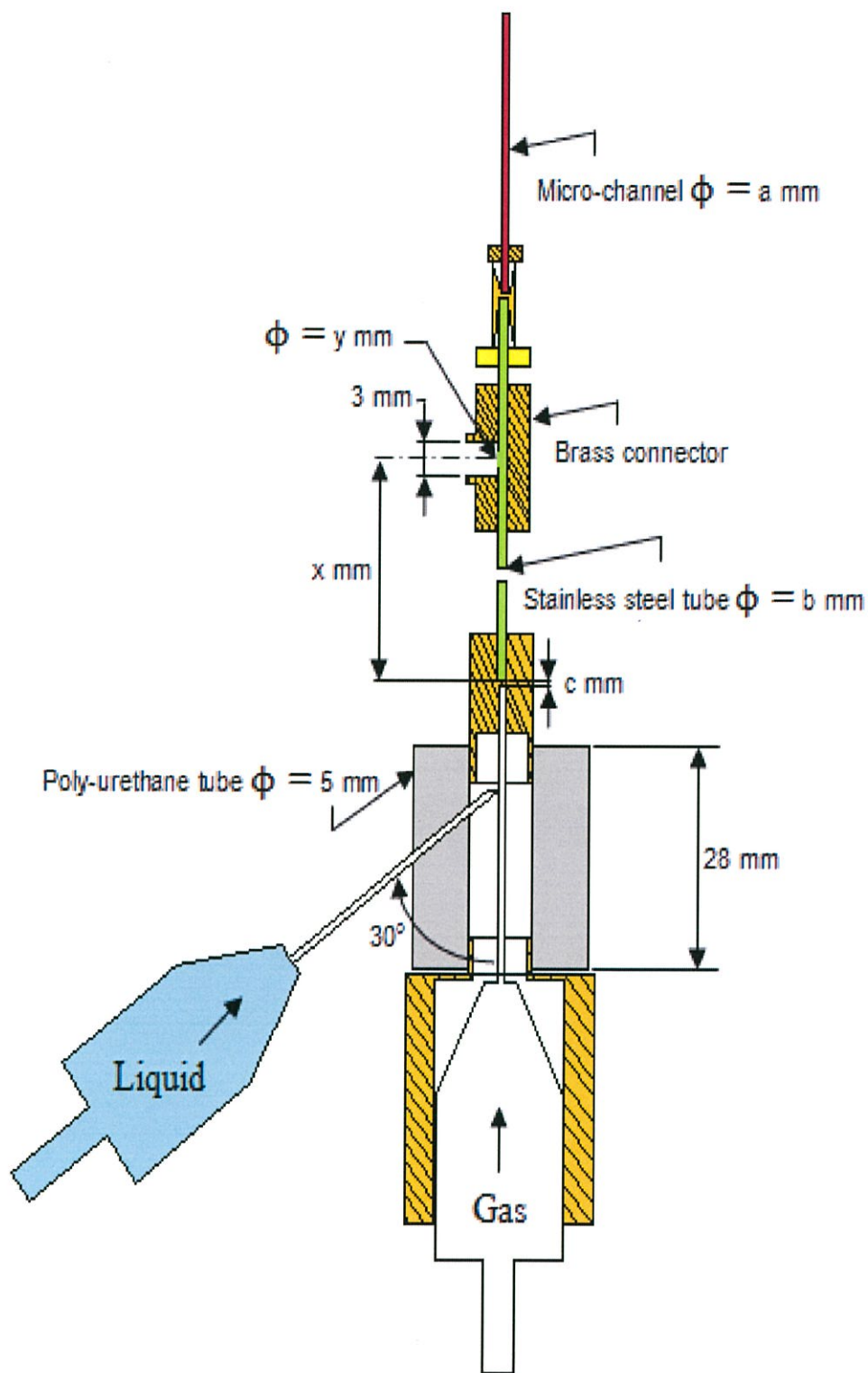


0.15 mm ID channel : $a = 0.15$, $b = 0.15$

0.22 mm ID channel : $a = 0.22$, $b = 0.15$

0.53 mm ID channel : $a = 0.53$, $b = 0.15$

รูปที่ 4.11 แสดงห้องผสมแบบ Cross-junction

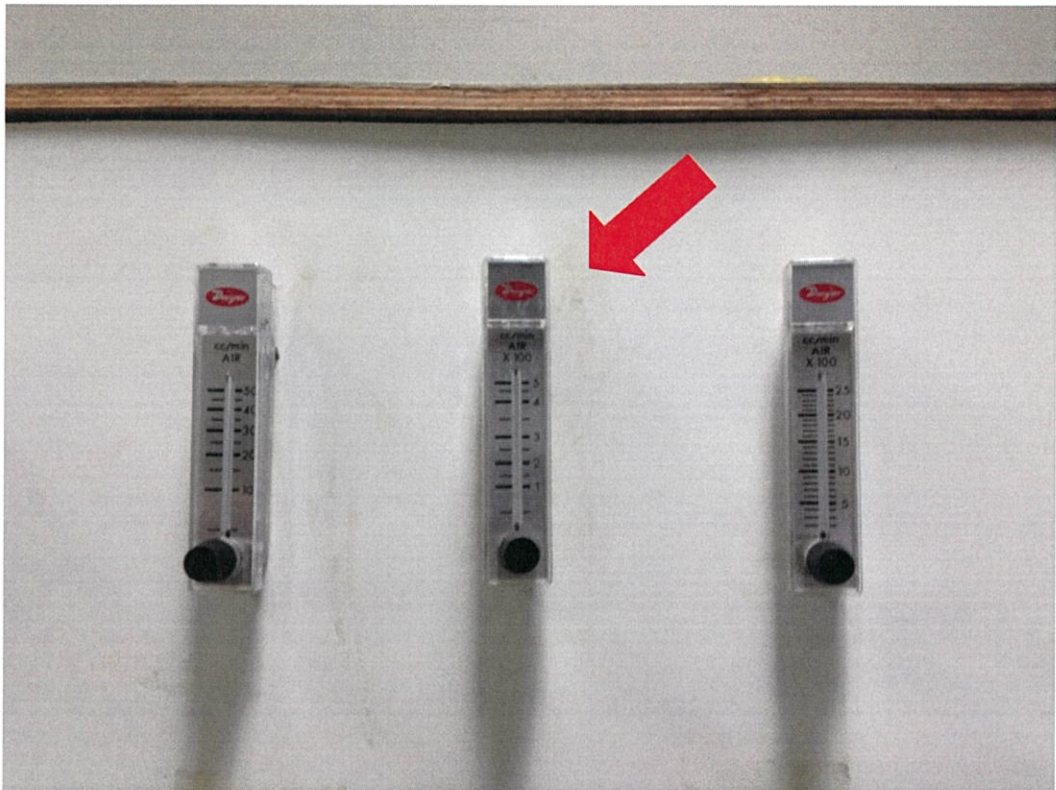


0.15 mm ID channel : $a = 0.15$, $b = 0.5$, $c = 1.5$, $x = 70$, $y = 0.3$

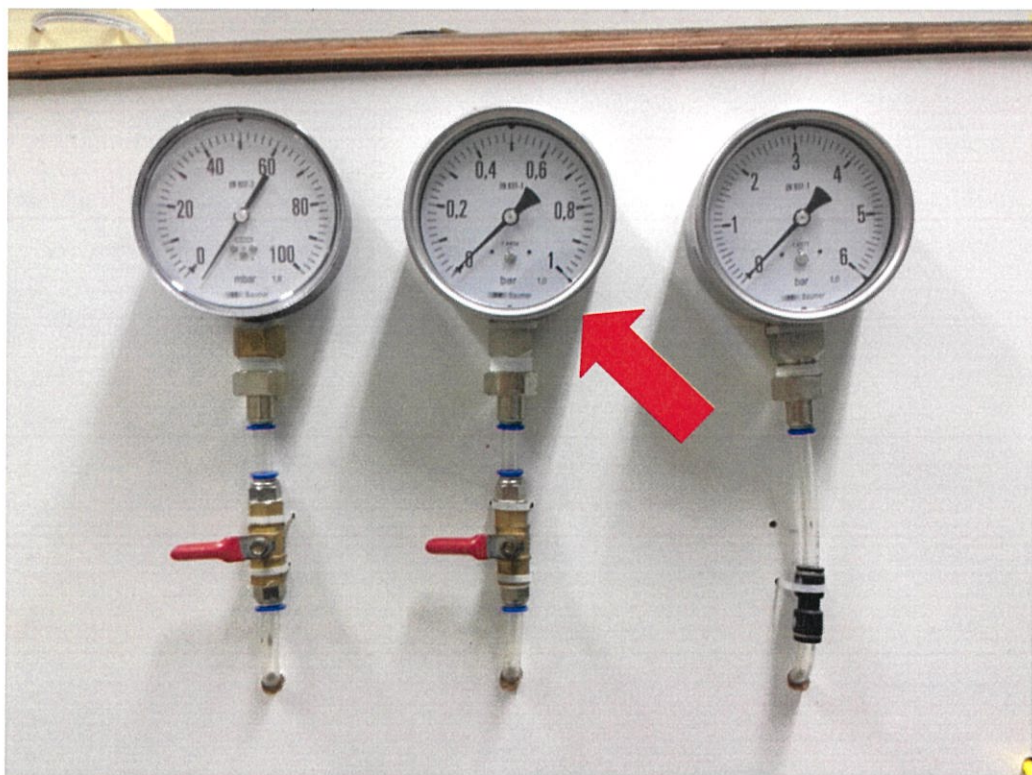
0.22 mm ID channel : $a = 0.22$, $b = 0.5$, $c = 1.5$, $x = 70$, $y = 0.3$

0.53 mm ID channel : $a = 0.53$, $b = 0.75$, $c = 4$, $x = 85$, $y = 0.5$

รูป 4.12 แสดงห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 4.13 แสดงตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ



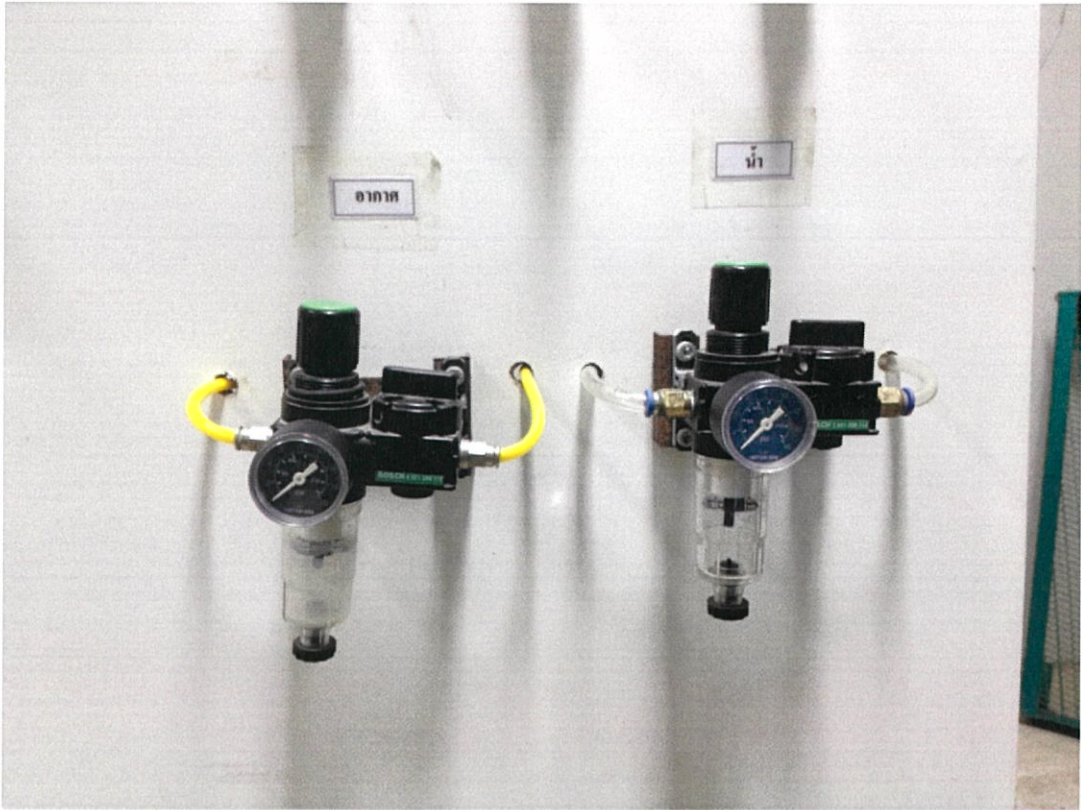
รูปที่ 4.14 แสดงเกจวัดความดัน



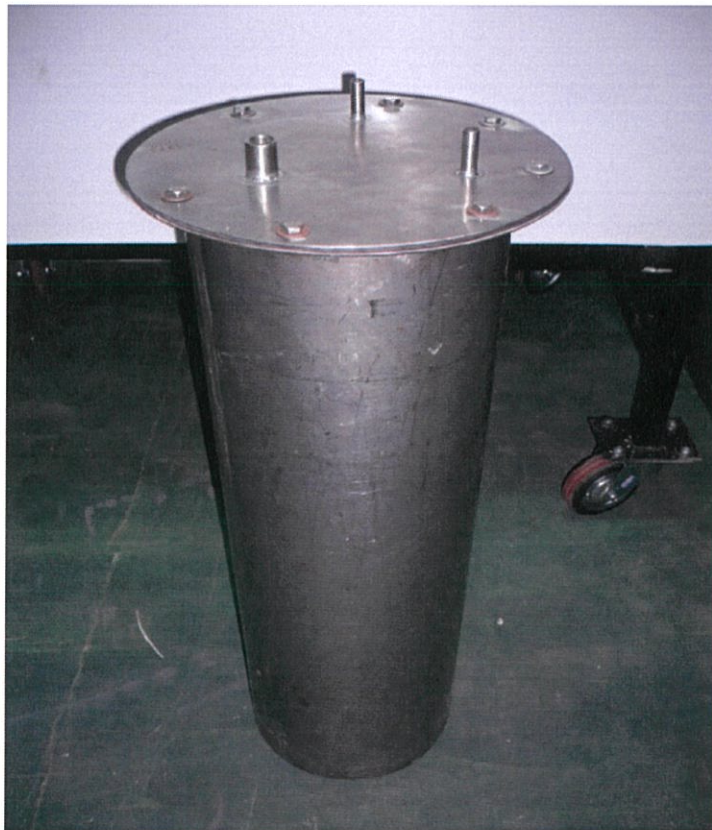
รูปที่ 4.15 แสดงจอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิทัล



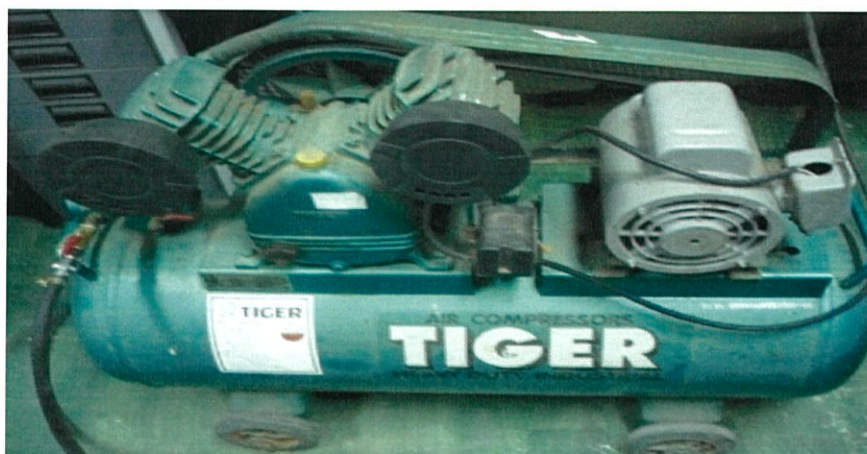
รูปที่ 4.16 แสดงตัวแปลงสัญญาณความดัน



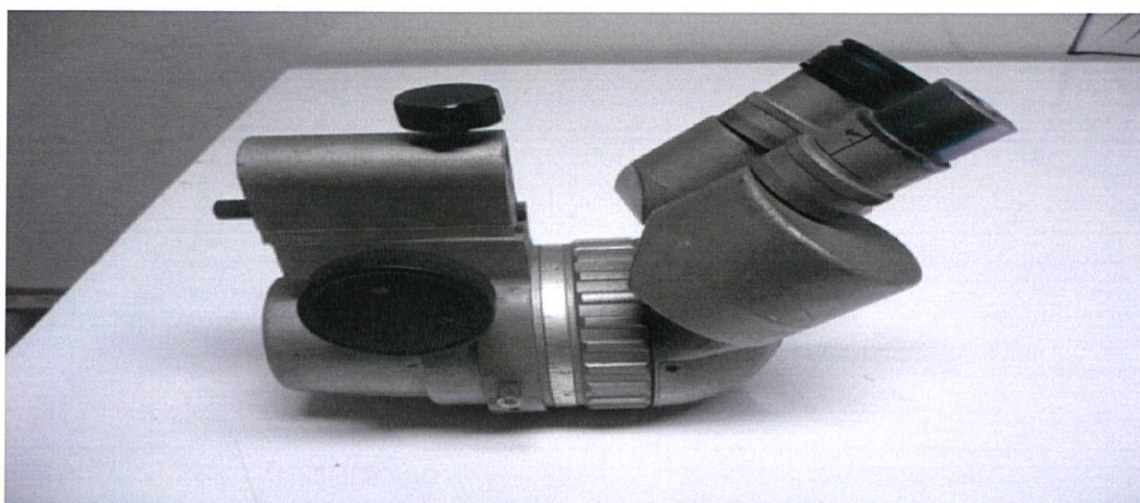
รูปที่ 4.17 แสดงตัวควบคุมความดัน



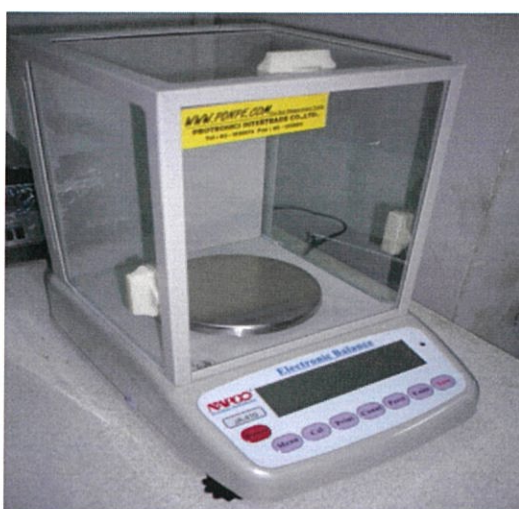
รูปที่ 4.18 แสดงถังเก็บน้ำ



รูปที่ 4.19 แสดงปั๊มลม



รูปที่ 4.20 แสดงกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 4.21 แสดงเครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (Electronic balance)

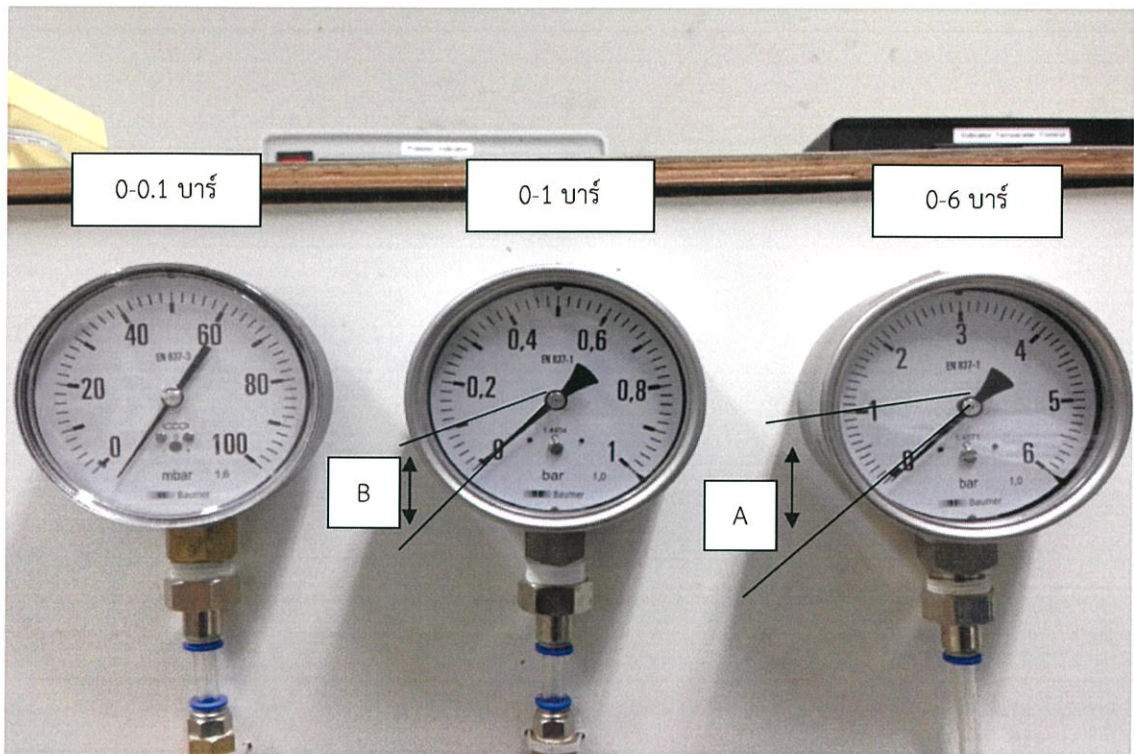
4.3 ข้อควรระวังในการทดลอง

1. ก่อนการทดลองควรเช็ควาระบบต่าง ๆ พร้อมที่จะใช้งานหรือไม่
2. ความดันในระบบไม่ควรเกิน 4 บาร์ เพราะอาจทำให้ระบบเกิดการเสียหายได้
3. ควรตรวจเช็คตัวควบคุมความดันว่าพร้อมใช้งานหรือไม่



รูปที่ 4.22 แสดงการใช้งานตัวควบคุมความดัน

4. การใช้เกจวัดความดันมีทั้งหมด 3 ขนาด คือ 0 - 0.1, 0 - 1 และ 0 - 6 บาร์ดังนั้นในการเปิดวาล์วใช้งานควรดูความดัน ไม่ควรเกินค่าช่วงความดันที่เกจแต่ละตัววัดได้



รูปที่ 4.23 แสดงช่วงความดันที่เกจแต่ละตัวรับได้

จากรูป ในช่วง A สามารถเปิดเกจขนาด 0 - 1 บาร์ได้ แต่ไม่สามารถเปิดเกจขนาด 0 - 0.1 ได้และในช่วง B จะสามารถเปิดเกจขนาด 0 - 0.1 บาร์ได้

5. ตัวปรับอัตราการไหลของอากาศจะรับความดันได้ไม่เกิน 4 บาร์
6. ในการทดลองช่วงแรกจะใช้ตัวแปลงสัญญาณความดัน ขนาดทำการทดลองให้สังเกตหน้าจอแสดงผลความดัน ถ้ามีค่าเกิน 19 มิลลิแอมป์ ให้เปลี่ยนไปใช้ขนาด 0 - 10 บาร์
7. ก่อนทำการทดลอง ควรเปิดวาล์วควบคุมการไหลของอากาศก่อน เพื่อให้อากาศไปไล่น้ำออกจากส่วนการทดสอบ
8. การบันทึกค่าต่างๆ ต้องบันทึกเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่
9. เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละครั้งควรปิดวาล์วน้ำก่อน และปล่อยให้อากาศไหลภายในท่อนานพอสมควร เพื่อป้องกันน้ำตกค้างอยู่ภายในท่อ

บทที่ 5

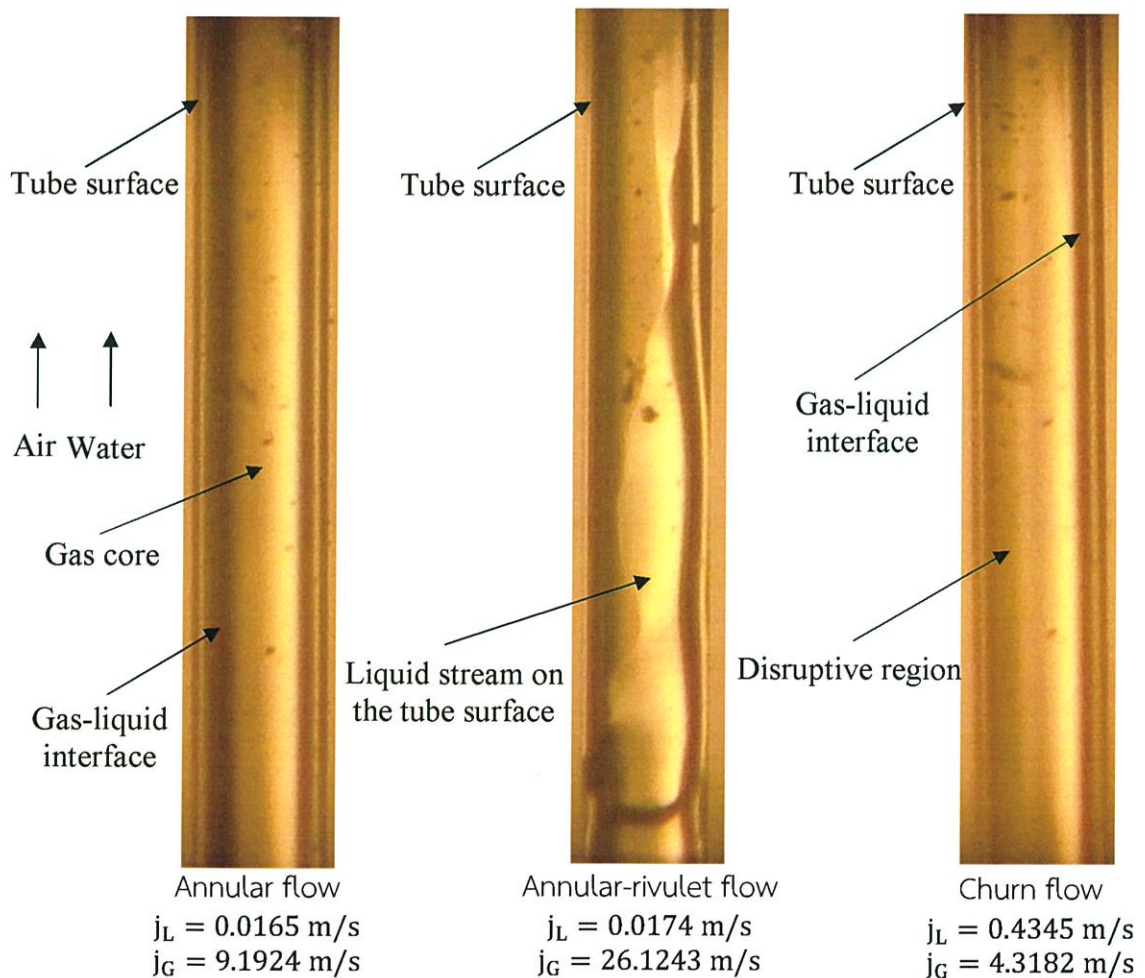
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

เนื่องจากตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษารูปแบบการไหลของการไหลสองสถานะ, ความดันลด และ Two-phase frictional multiplier ในท่อไมโครเซนแนลและห้องผสมที่แตกต่างกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการเปิดวาล์วของน้ำและอากาศ โดยปรับให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ และปรับอัตราการไหลของอากาศจากค่าต่ำไปค่าสูงจากนั้นสังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น แล้วทำการบันทึกผลจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหล

5.1 รูปแบบการไหลที่ได้จากการทดลอง

รูปแบบการไหลของท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Cross-junction



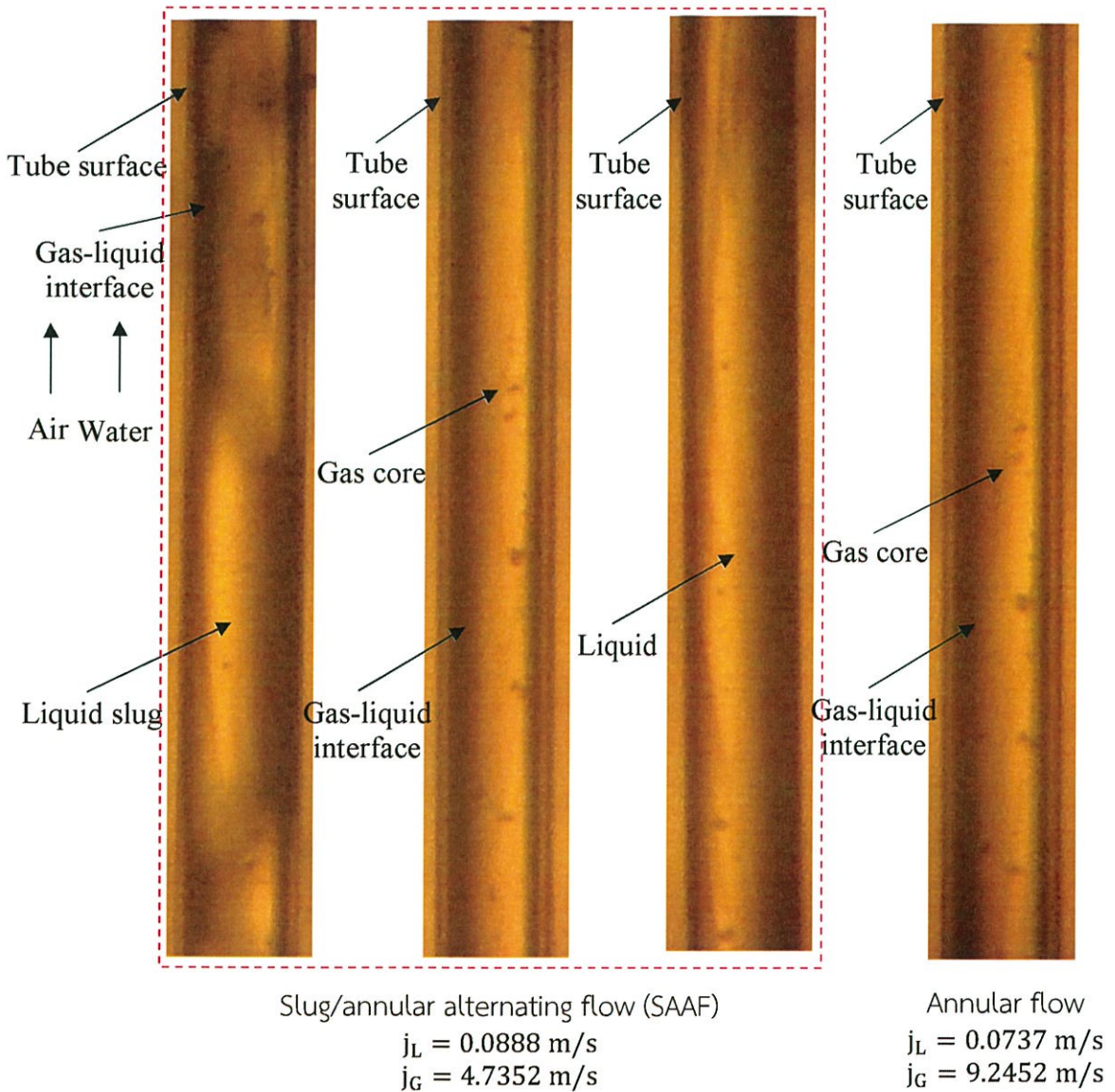
รูปที่ 5.1 รูปแบบการไหลในท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 mm :

Cross-junction

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Cross-junction พบ 3 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ
2. Annular-rivulet flow : เป็นที่สังเกต annular flow จะสลับกับการไหลของสายน้ำเหมือนแม่น้ำบนพื้นผิวท่อ
3. Churn flow : เกิดจากฟองแก๊สเมื่อมีความเร็วมากขึ้นก็จะแตกตัวกลายเป็นฟองแบบปั่นป่วน พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูง

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet



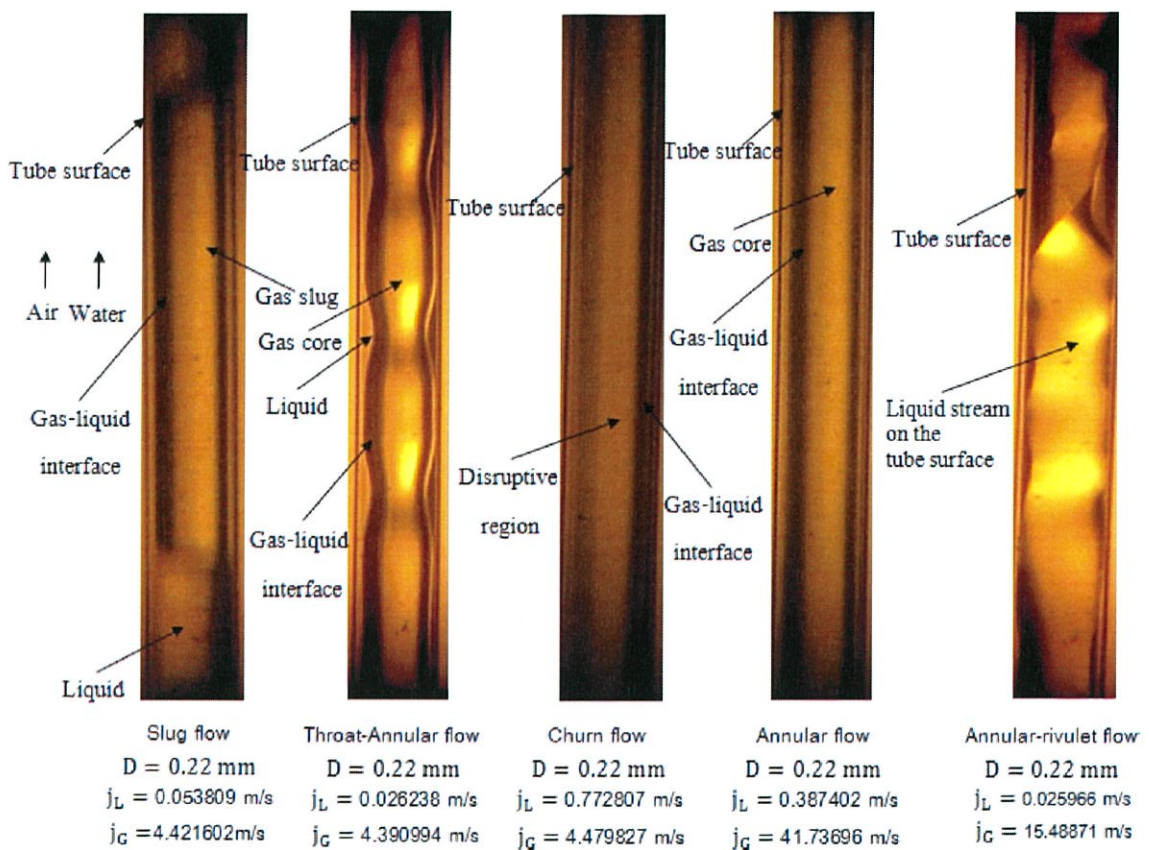
รูปที่ 5.2 รูปแบบการไหลในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 mm : Y-junction with reducer inlet

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet พบ 2 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Slug/annular alternating flow (SAAF) : ในรูปแบบการไหลนี้จะประกอบด้วย annular flow และมีรูปแบบการไหลอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองของ slug flow และ liquid-alone flow

2. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Cross-junction



รูปที่ 5.3 รูปแบบการไหลในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 mm : Cross-junction

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Cross-junction พบ 5 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Slug flow : ซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศค่อนข้างต่ำ มีลักษณะฟองยาวที่ไหลไปในทิศทางตามแนวแกน

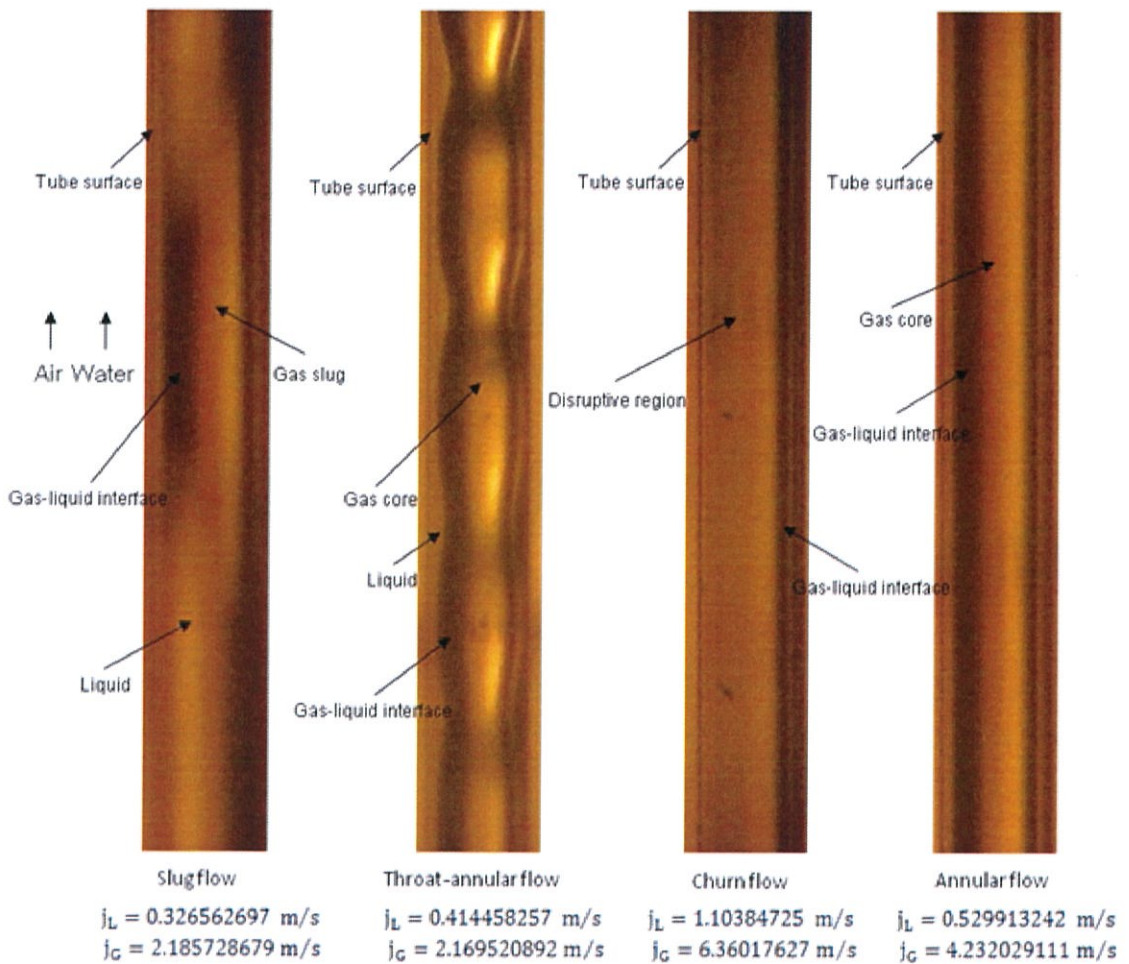
2. Throat-annular flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวต่ำ การเกิดตัวของรูปแบบ throat-annular flow พัฒนาจากรูปแบบการไหล slug flow มาชนกันจนเกิดเป็นคอคอด

3. Churn flow : เกิดจากฟองแก๊สเมื่อมีความเร็วมากขึ้นก็จะแตกตัวกลายเป็นฟองแบบปั่นป่วน พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูง

4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้มีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ

5. Annular-rivulet flow : เป็นที่สังเกต annular flow จะสลับกับการไหลของสายน้ำเหมือนเมื่อน้ำบนพื้นผิวท่อ

รูปแบบการไหลของท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.4 รูปแบบการไหลในท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 mm : Y-junction with reducer inlet

รูปแบบการไหลของท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet พบ 4 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

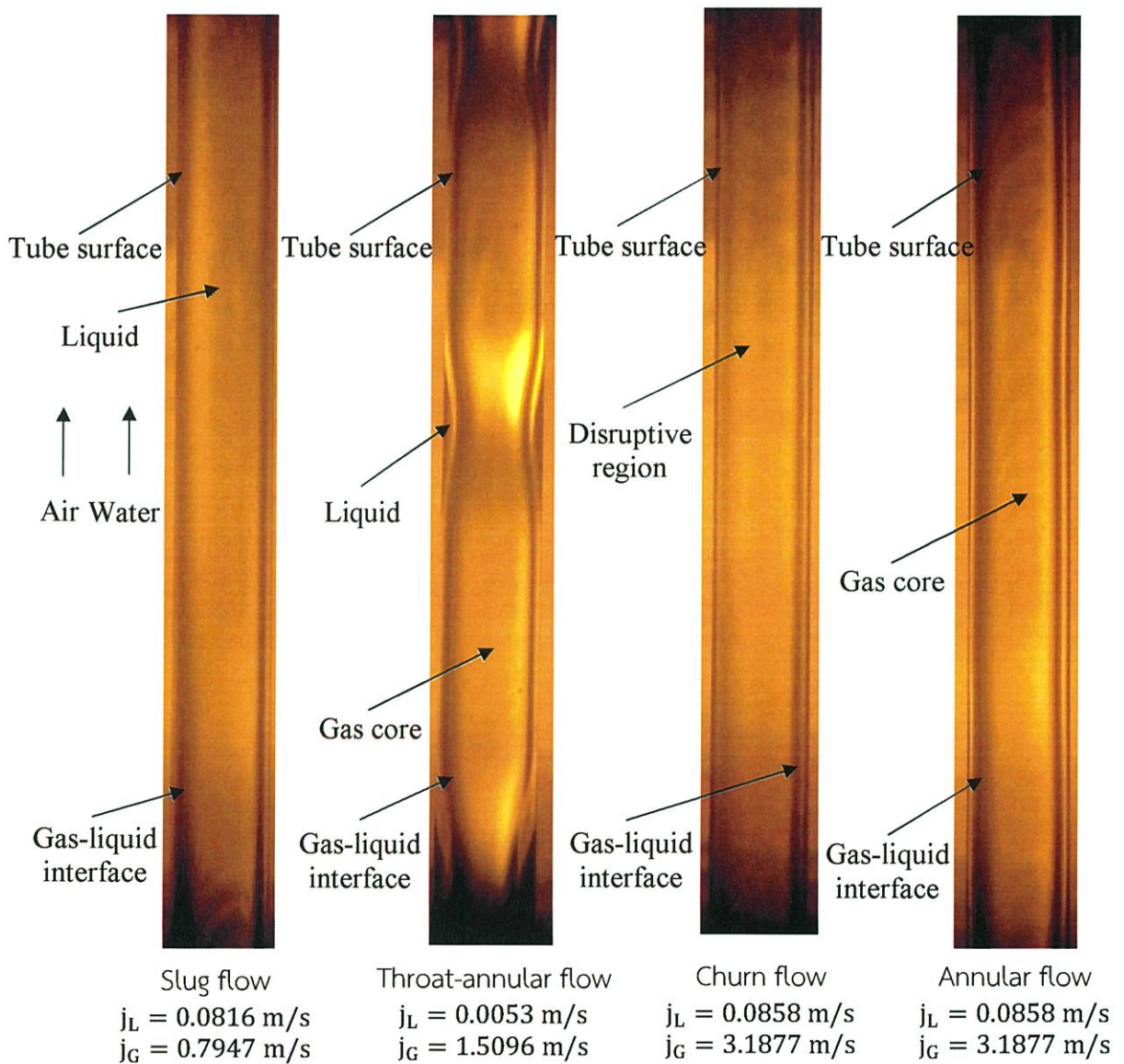
1. Slug flow : ซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศค่อนข้างต่ำ มีลักษณะฟองยาวที่ไหลไปในทิศทางตามแนวแกน

2. Throat-annular flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวต่ำ การเกิดตัวของรูปแบบ throat-annular flow พัฒนาจากรูปแบบการไหล slug flow มาชนกันจนเกิดเป็นคอคอด

3. Churn flow : เกิดจากฟองแก๊สเมื่อมีความเร็วมากขึ้นก็จะแตกตัวกลายเป็นฟองแบบปั่นป่วน พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูง

4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ

รูปแบบการไหลของท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Cross-junction

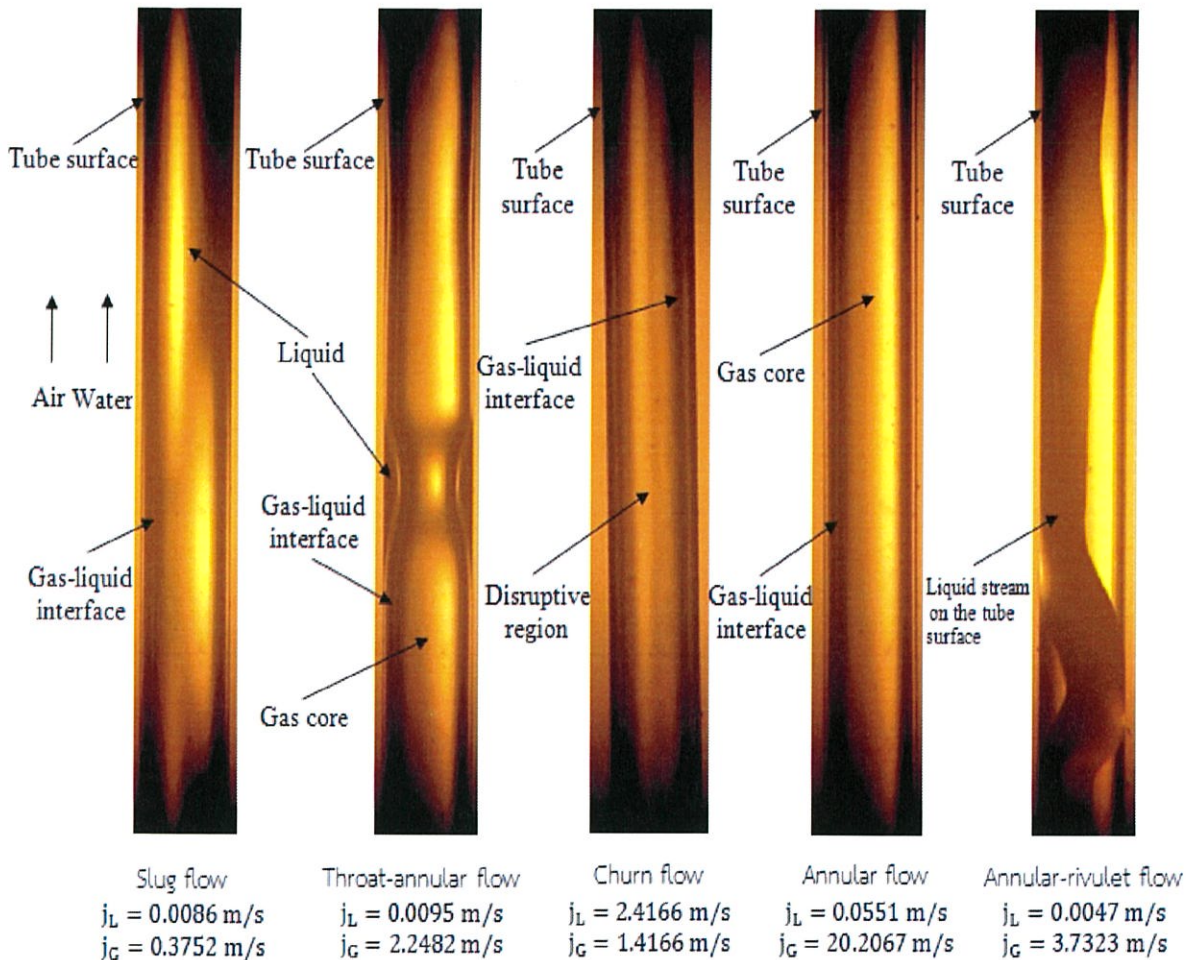


รูปที่ 5.5 รูปแบบการไหลในท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 mm : Cross-junction

รูปแบบการไหลของท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Cross-junction พบ 4 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Slug flow : ซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศค่อนข้างต่ำ มีลักษณะฟองยาวที่ไหลไปในทิศทางตามแนวแกน
2. Throat-annular flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวต่ำ การเกิดตัวของรูปแบบ throat-annular flow พัฒนาจากรูปแบบการไหล slug flow มาจนกันจนเกิดเป็นคอคอด
3. Churn flow : เกิดจากฟองแก๊สเมื่อมีความเร็วมากขึ้นก็จะแตกตัวกลายเป็นฟองแบบปั่นป่วน พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูง
4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ

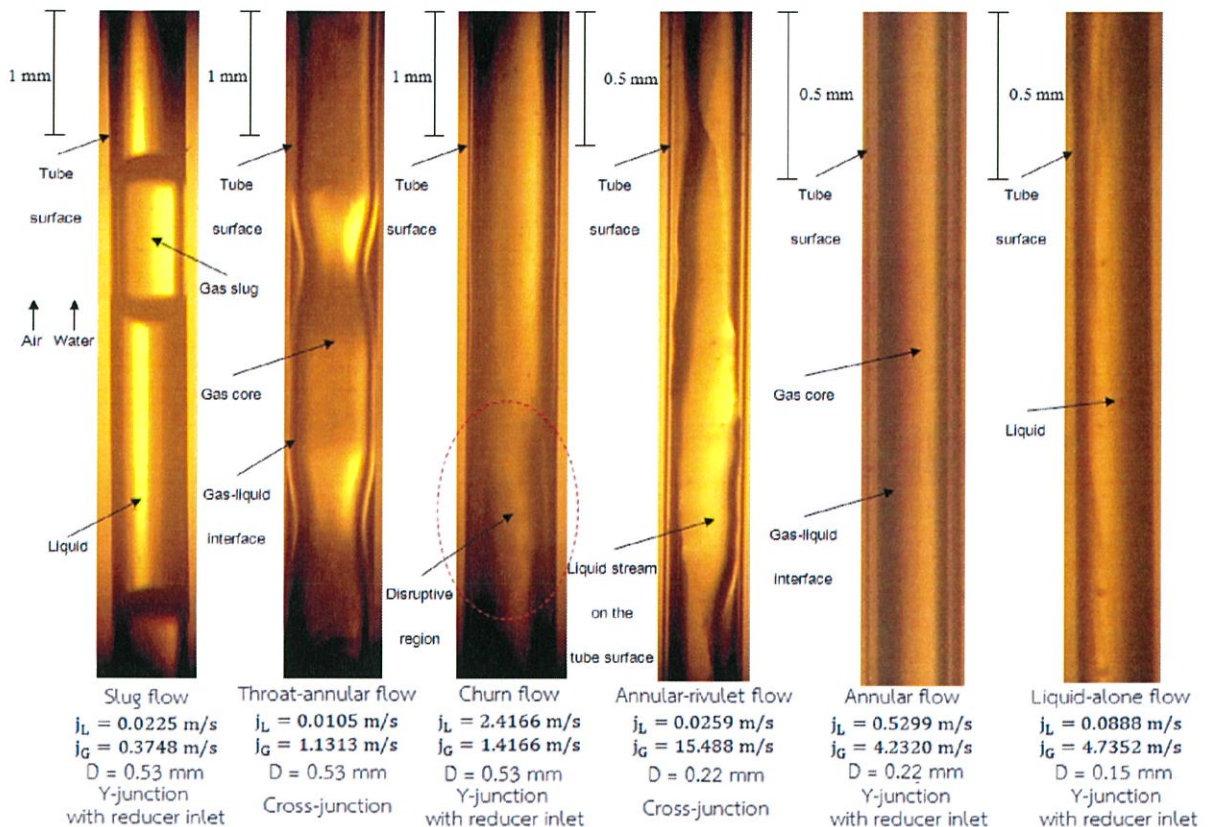
รูปแบบการไหลของท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.6 รูปแบบการไหลในท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 mm : Y-junction with reducer inlet

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร โดยใช้ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet พบ 5 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Slug flow : ซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศค่อนข้างต่ำ มีลักษณะฟองยาวที่ไหลไปในทิศทางตามแนวแกน
2. Throat-annular flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวต่ำ การเกิดตัวของรูปแบบ throat-annular flow พัฒนาจากรูปแบบการไหล slug flow มาจนกันจนเกิดเป็นคอคอด
3. Churn flow : เกิดจากฟองแก๊สเมื่อมีความเร็วมากขึ้นก็จะแตกตัวกลายเป็นฟองแบบปั่นป่วนพบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูง
4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ
5. Annular-rivulet flow : เป็นที่สังเกต annular flow จะสลับกับการไหลของสายน้ำเหมือนแม่น้ำบนพื้นผิวท่อ

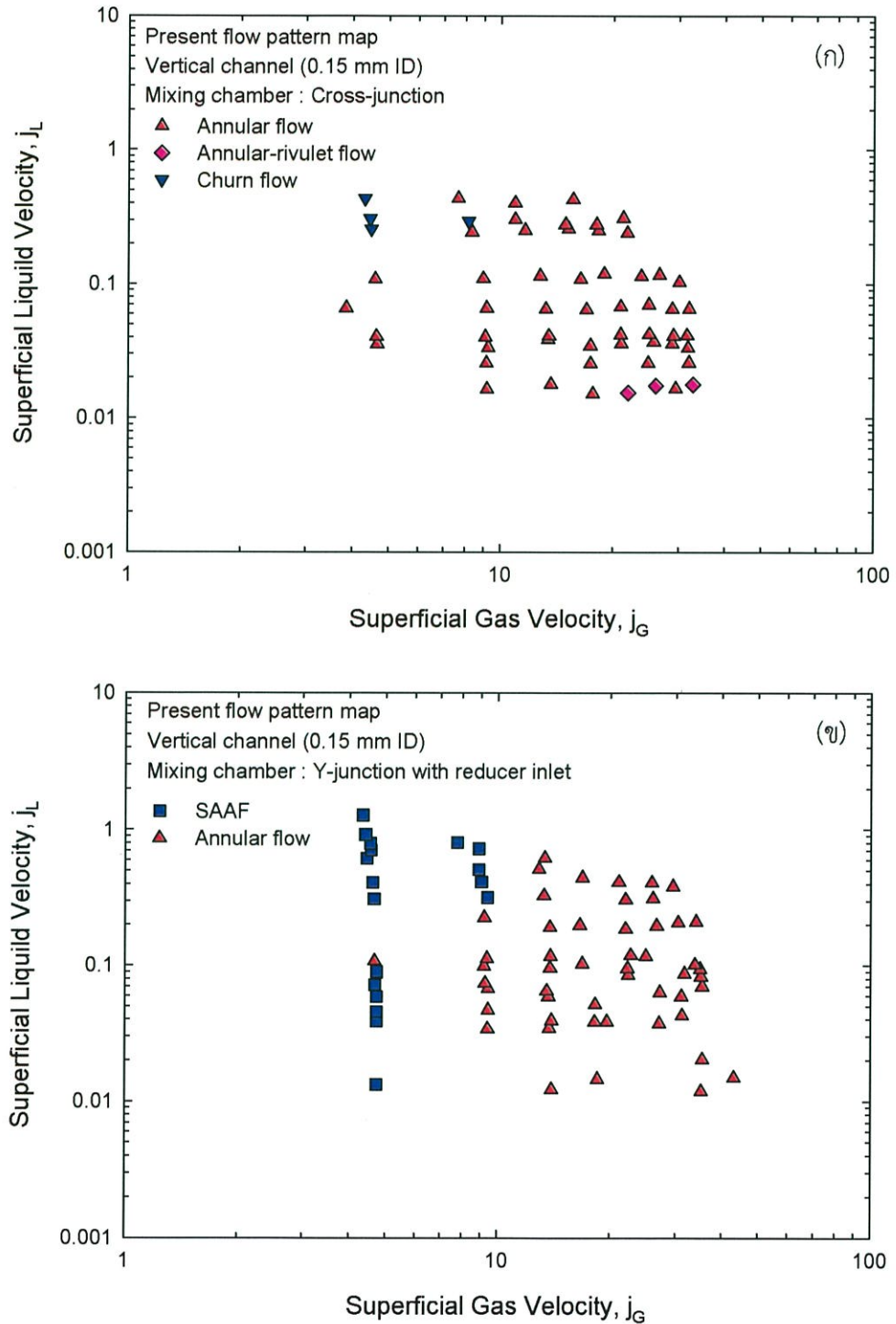


รูปที่ 5.7 รูปแบบการไหลสองสถานะในไมโครแชนแนลแนวตั้งในท่อขนาดต่างๆ

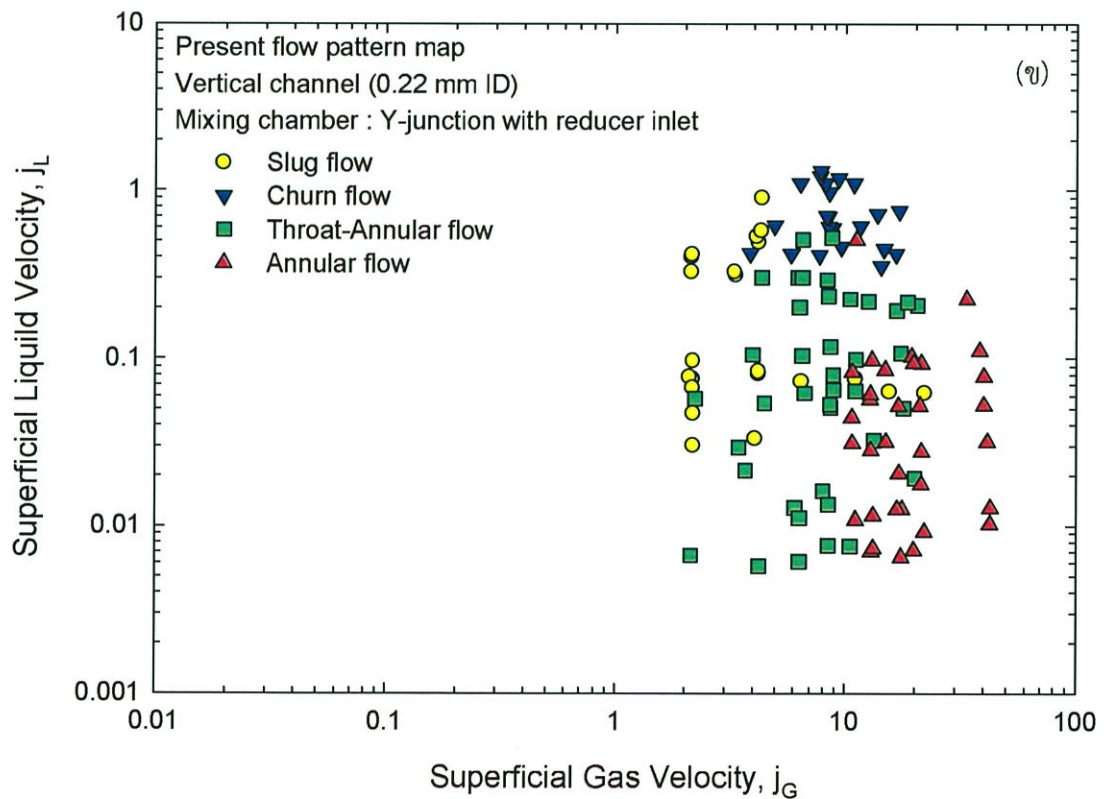
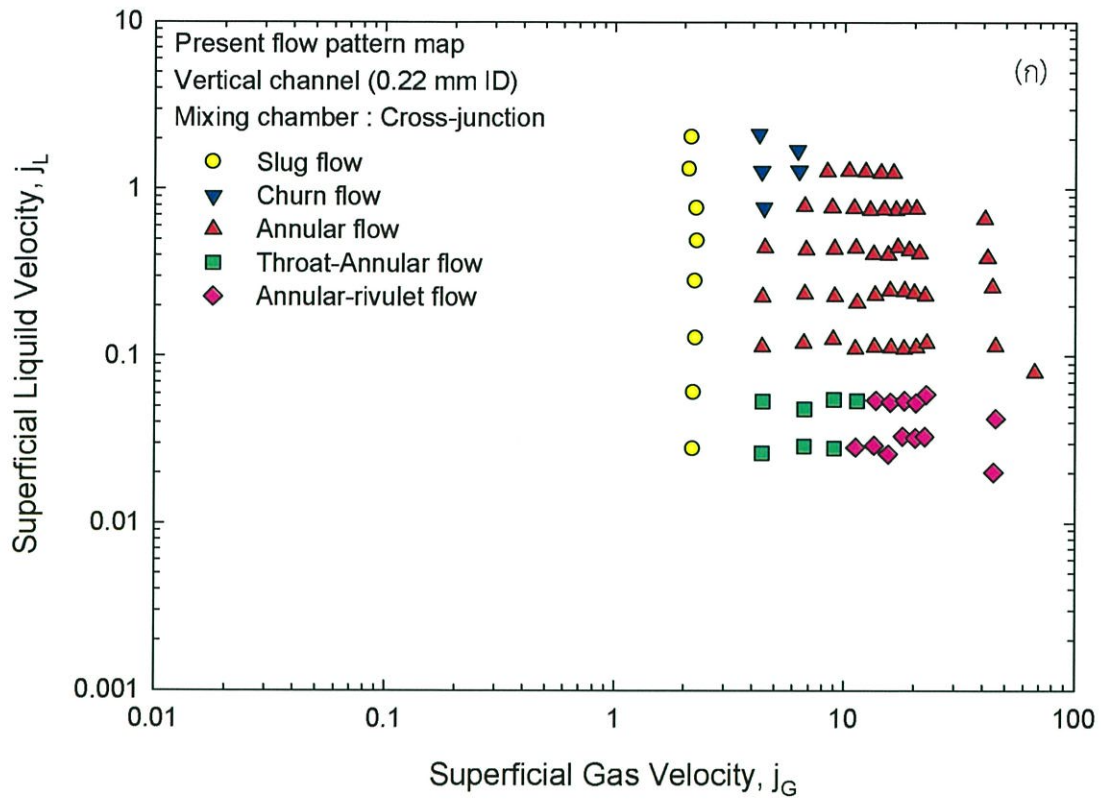
รูปแบบการไหลที่ได้รับจากท่อไมโครแชนแนลแนวตั้งในการทดลองนี้ ได้แก่ annular flow, annular-rivulet flow, churn flow, slug/annular alternating flow, slug flow และ throat-annular flow

5.2 แผนภูมิรูปแบบการไหล (Flow pattern map)

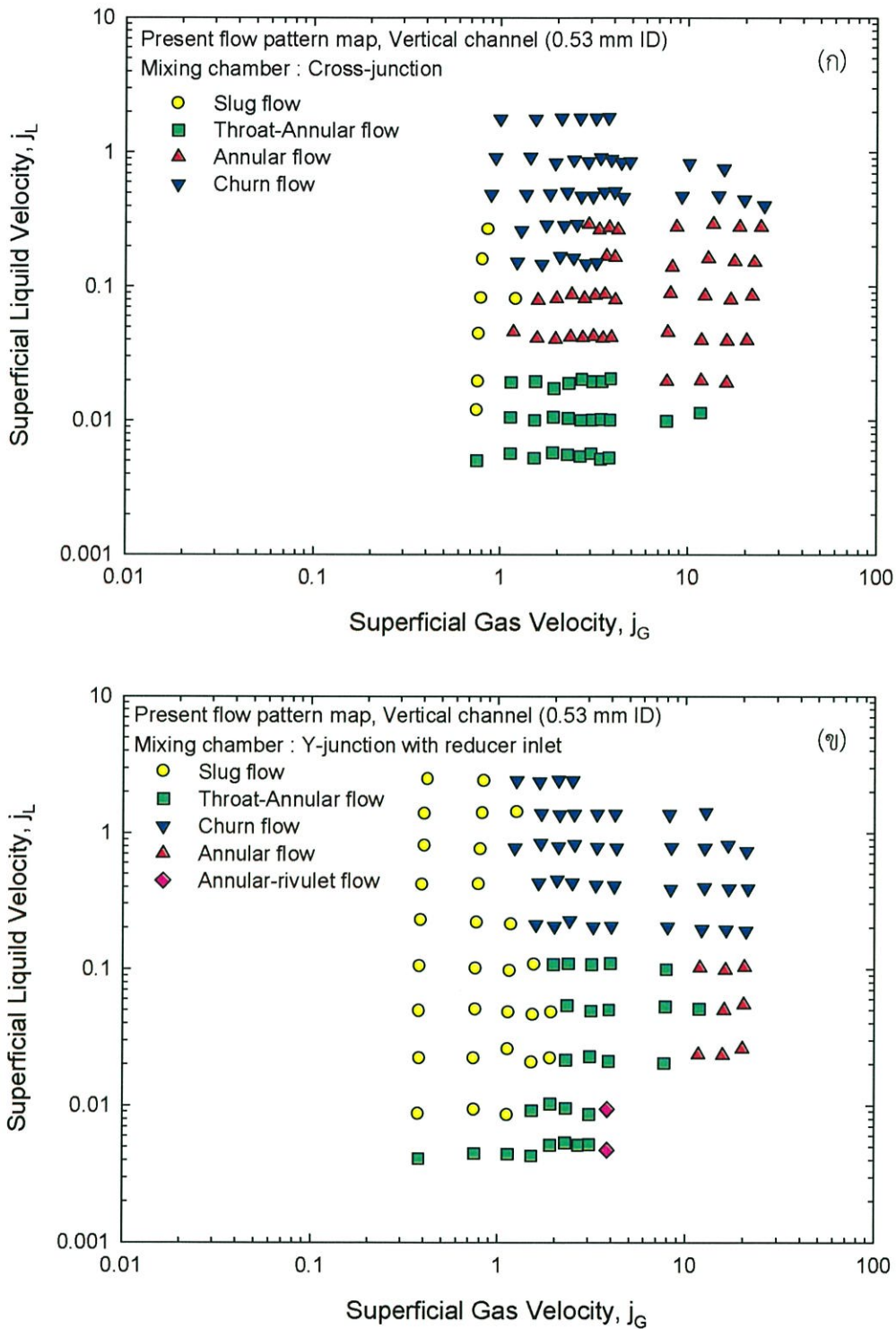
จากข้อมูลการทดลองในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร ยาว 104, 120 และ 320 มิลลิเมตร สามารถนำมาสร้างแผนภูมิการไหล โดยระบุข้อมูลรูปแบบการไหล แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของน้ำและความเร็วของอากาศ



รูปที่ 5.8 แผนภูมิรูปแบบการไหลของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction และ (ข) Y-junction with reducer inlet

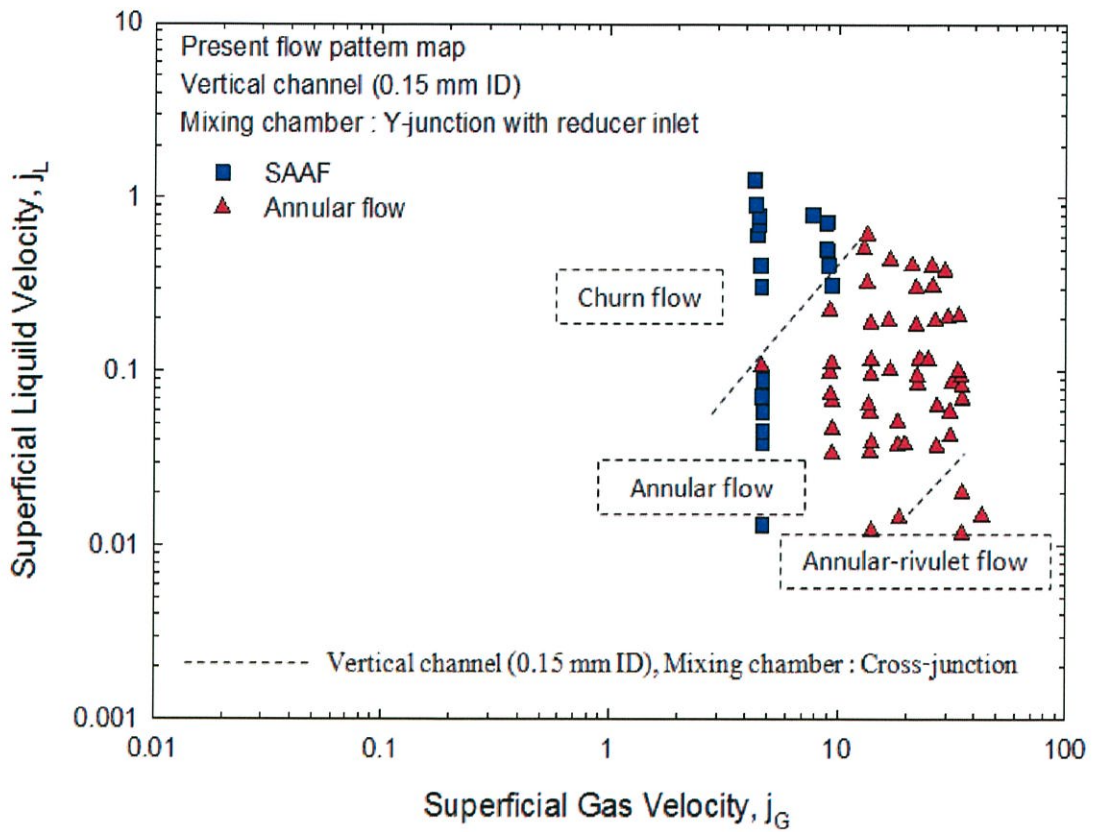


รูปที่ 5.9 แผนภูมิรูปแบบการไหลของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction และ (ข) Y-junction with reducer inlet

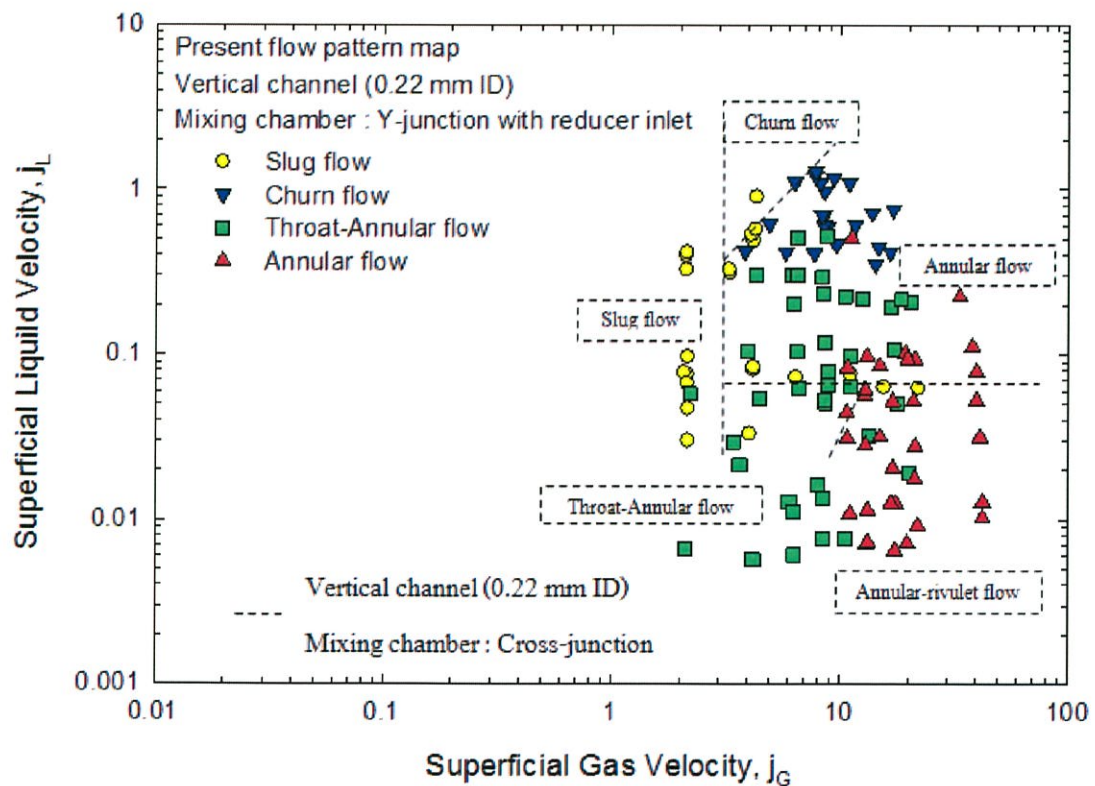


รูปที่ 5.10 แผนภูมิรูปแบบการไหลของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction และ (ข) Y-junction with reducer inlet

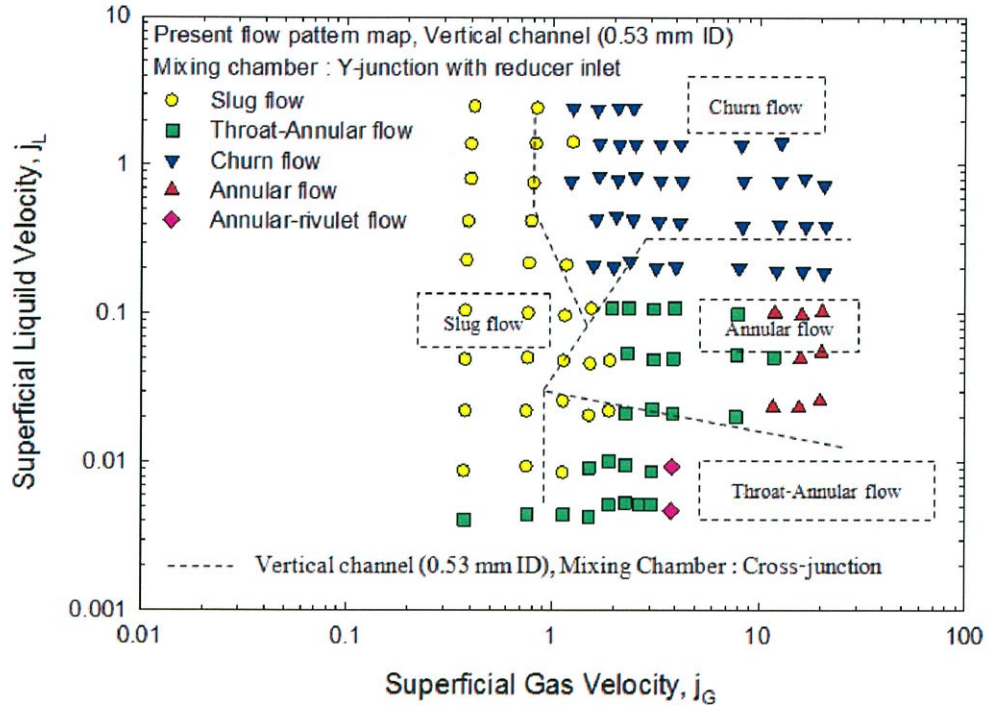
ในรูปที่ 5.8-5.10 เป็นผลการทดลองงานปัจจุบันของห้องผสมทั้ง 2 ชนิด ระหว่าง Cross-junction (รูปที่ 4.11) และ Y-junction with reducer inlet (รูปที่ 4.12) ในแต่ละจุดก็จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามการแบ่งของลักษณะรูปแบบการไหลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล ของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 mm ยาว 104 มิลลิเมตร

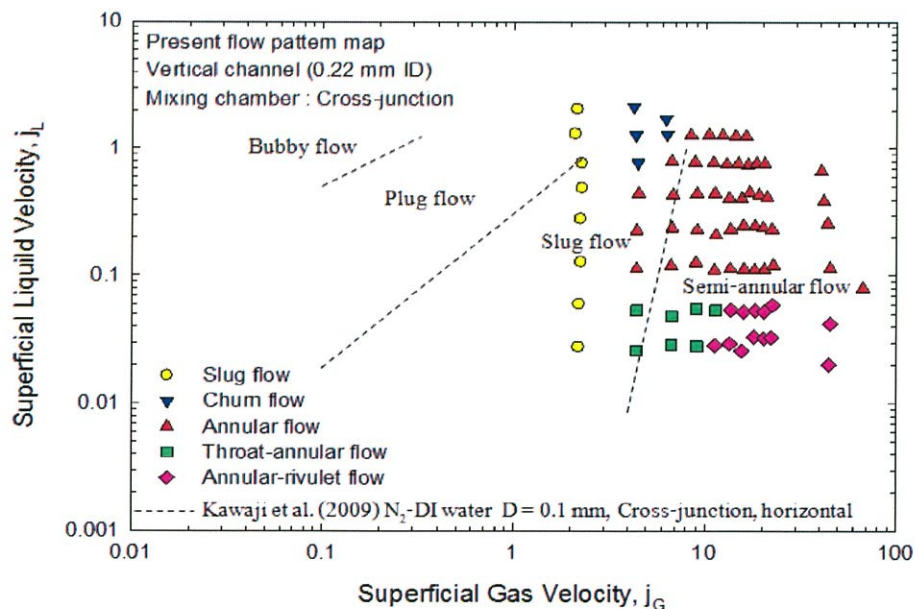


รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล ของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 mm ยาว 120 มิลลิเมตร

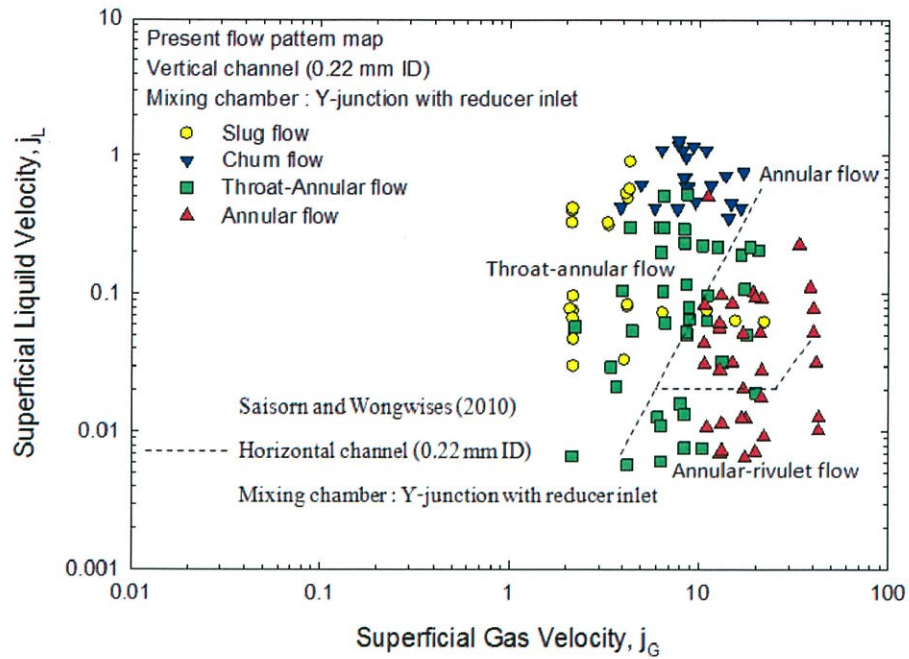


รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล ของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 mm ยาว 320 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.11-5.13 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองงานปัจจุบันของห้องผสมทั้ง 2 ชนิด โดยนำเส้นแบ่งขอบเขตของห้องผสมแบบ Cross-junction มาเทียบในกราฟผลการทดลองของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าเมื่อท่อมีขนาดลดลงผลของห้องผสมที่มีต่อรูปแบบการไหลจะชัดเจนยิ่งขึ้น เนื่องมาจากยิ่งท่อมีขนาดเล็กลงก่อให้เกิดแรงตึงผิวมีมากยิ่งขึ้น การไหลจึงไม่มั่นคง ทำให้ผลของรูปทรงของห้องผสมมาเกี่ยวข้องมากยิ่งขึ้น

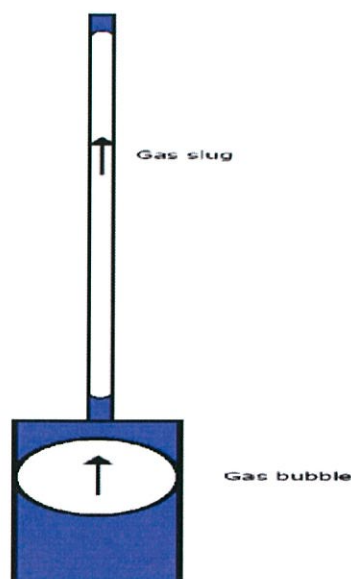


รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลที่ได้จากการวางตัวของท่อที่แตกต่างกัน : ห้องผสมแบบ Cross-junction



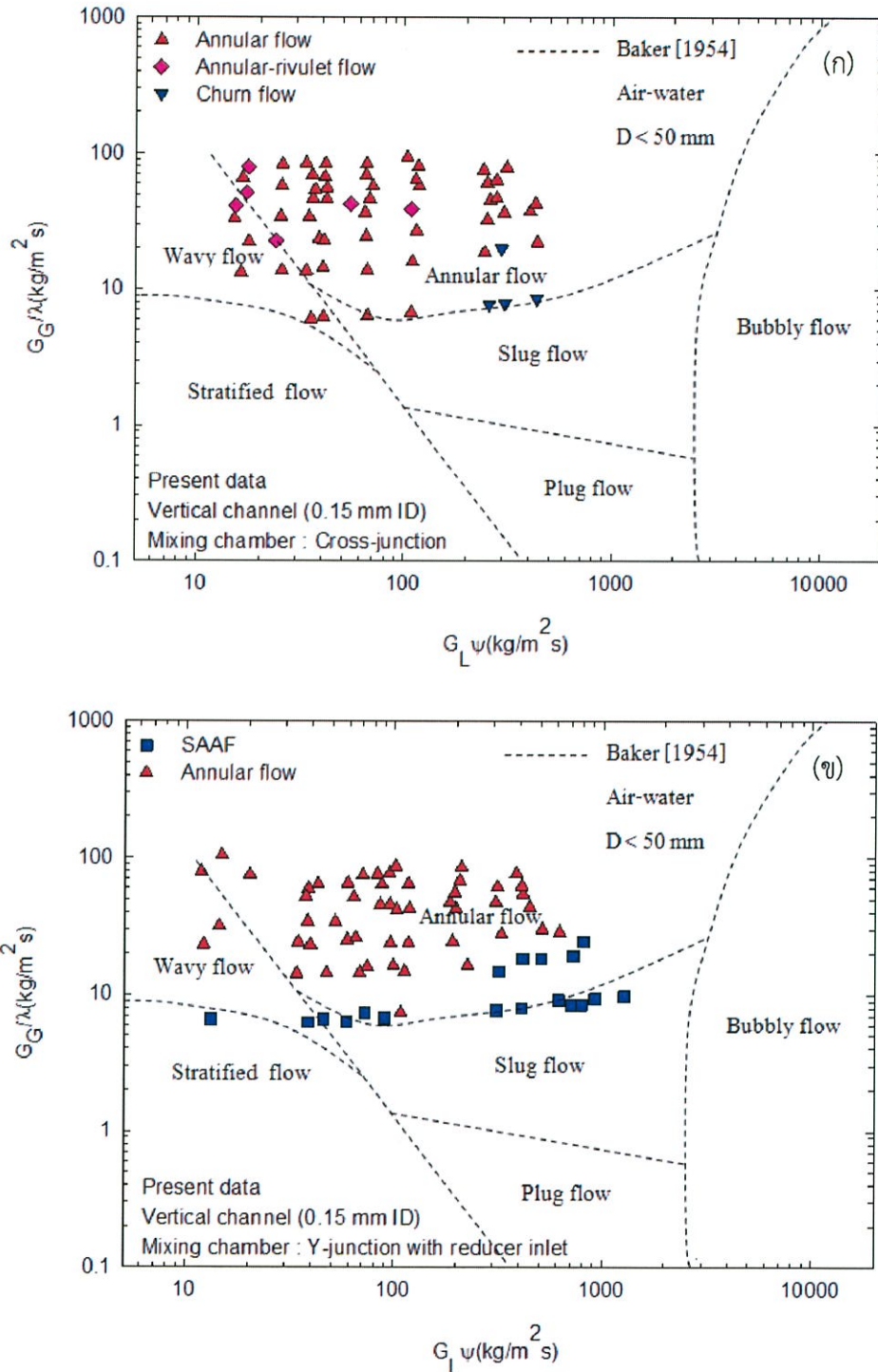
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลที่ได้จากการวางตัวของท่อที่แตกต่างกัน : ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet

เนื่องจากในห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet มีการลดขนาด เมื่อพองอากาศขนาดใหญ่ เข้าไปสู่ท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กลง ความยาวของพองอากาศก็จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.16 เนื่องจากท่อวางตัวในแนวตั้ง ทำให้ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ได้รับผลกระทบจากแรงลอยตัวมากกว่าในห้องผสมแบบ Cross-junction (Kawaji และคณะ (2009)) ดังนั้นจากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่มีการวางตัวของท่อที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อรูปแบบการไหล ในห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet จะแสดงผลได้อย่างชัดเจน

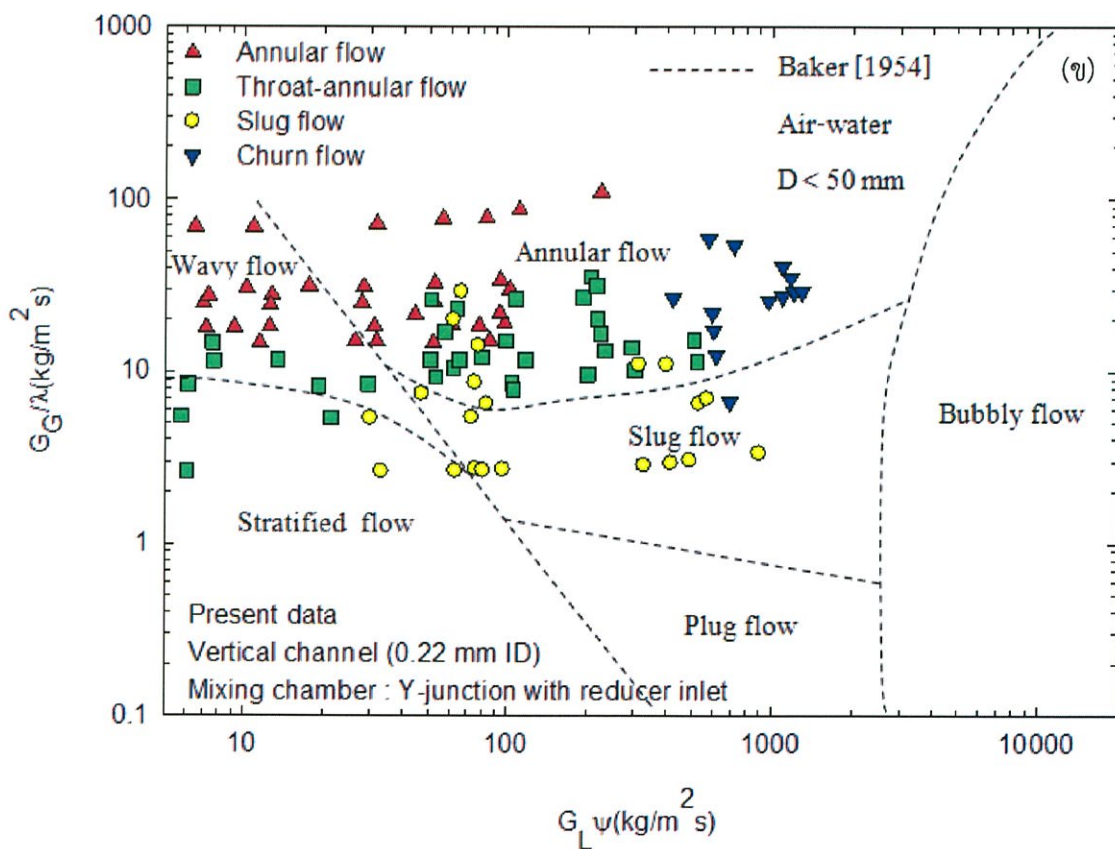
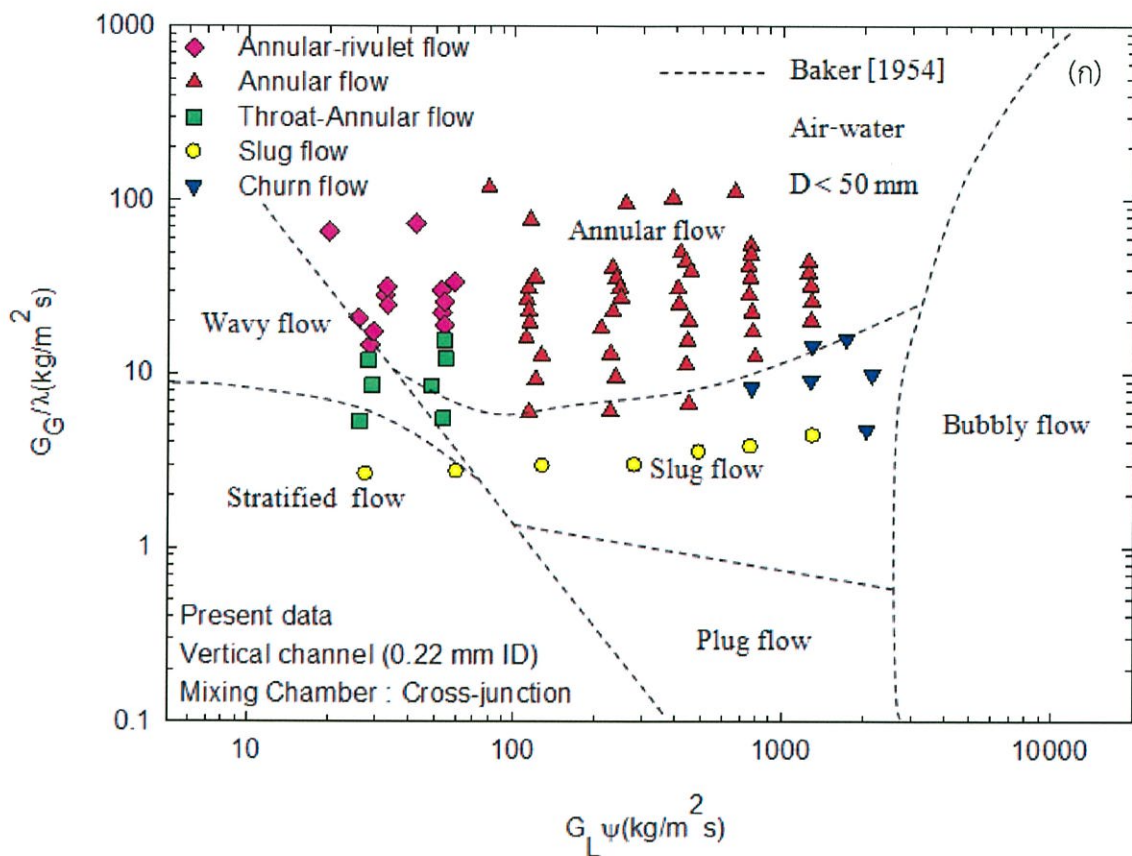


รูปที่ 5.16 ลักษณะการทำงานของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet

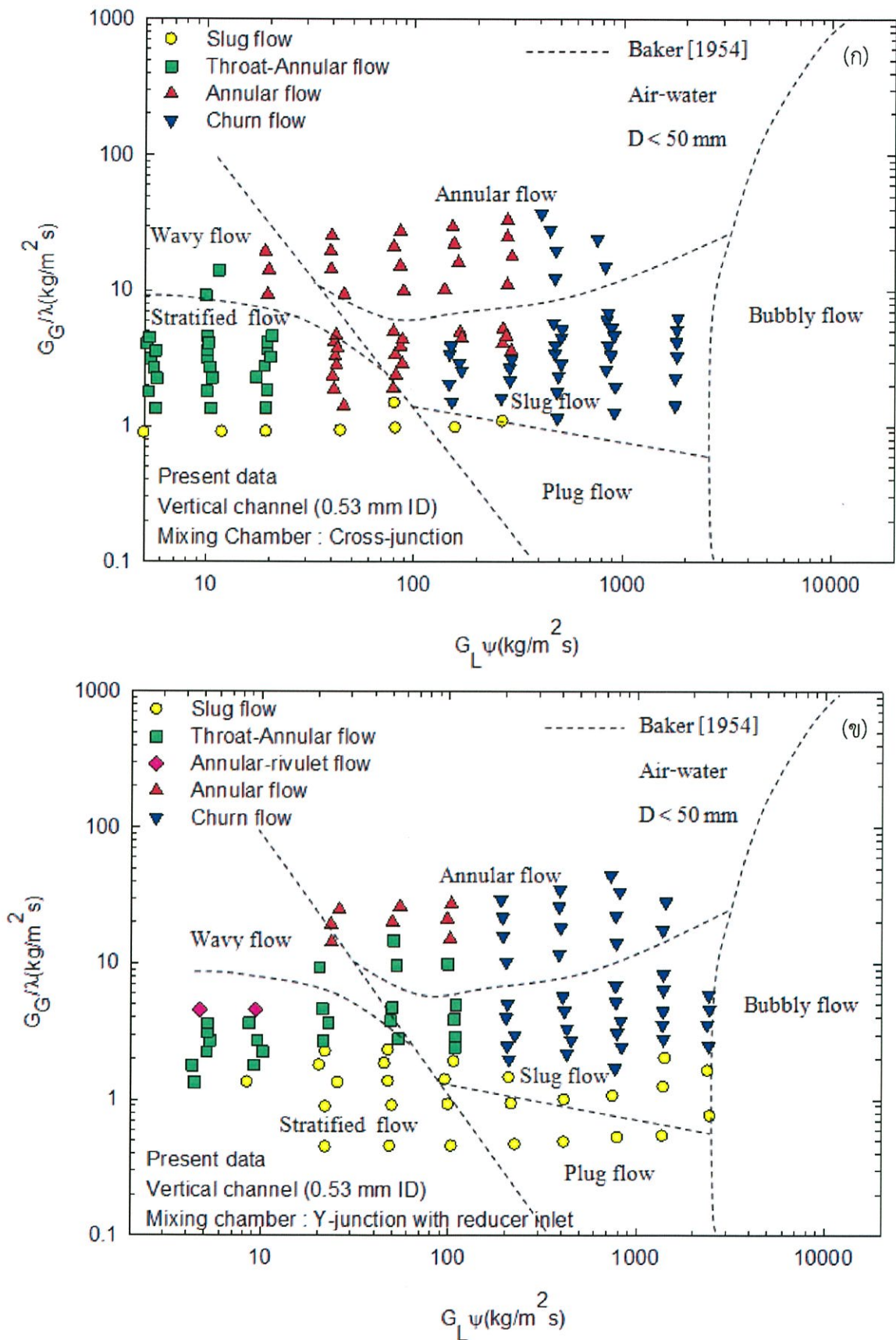
จากการเปรียบเทียบรูปที่ 5.17-5.19 แสดงให้เห็นว่าเส้นแบ่งขอบเขตโดย Baker (1954) สามารถทำนายรูปแบบการไหลแบบ annular flow ได้สำหรับทุกท่อ(ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53, 0.22, 0.15 มิลลิเมตร) และห้องผสมทั้งสองชนิด เนื่องจากเส้นแบ่งขอบเขตของนักวิจัยท่านนี้เป็นเส้นแบ่งขอบเขตสำหรับท่อขนาดปกติและรูปแบบการไหลแบบ annular flow ก็เป็นรูปแบบการไหลที่พบได้ในท่อขนาดปกติ ดังนั้นจึงสามารถทำนายได้โดยเส้นแบ่งขอบเขตของนักวิจัยท่านนี้



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Baker (1954) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

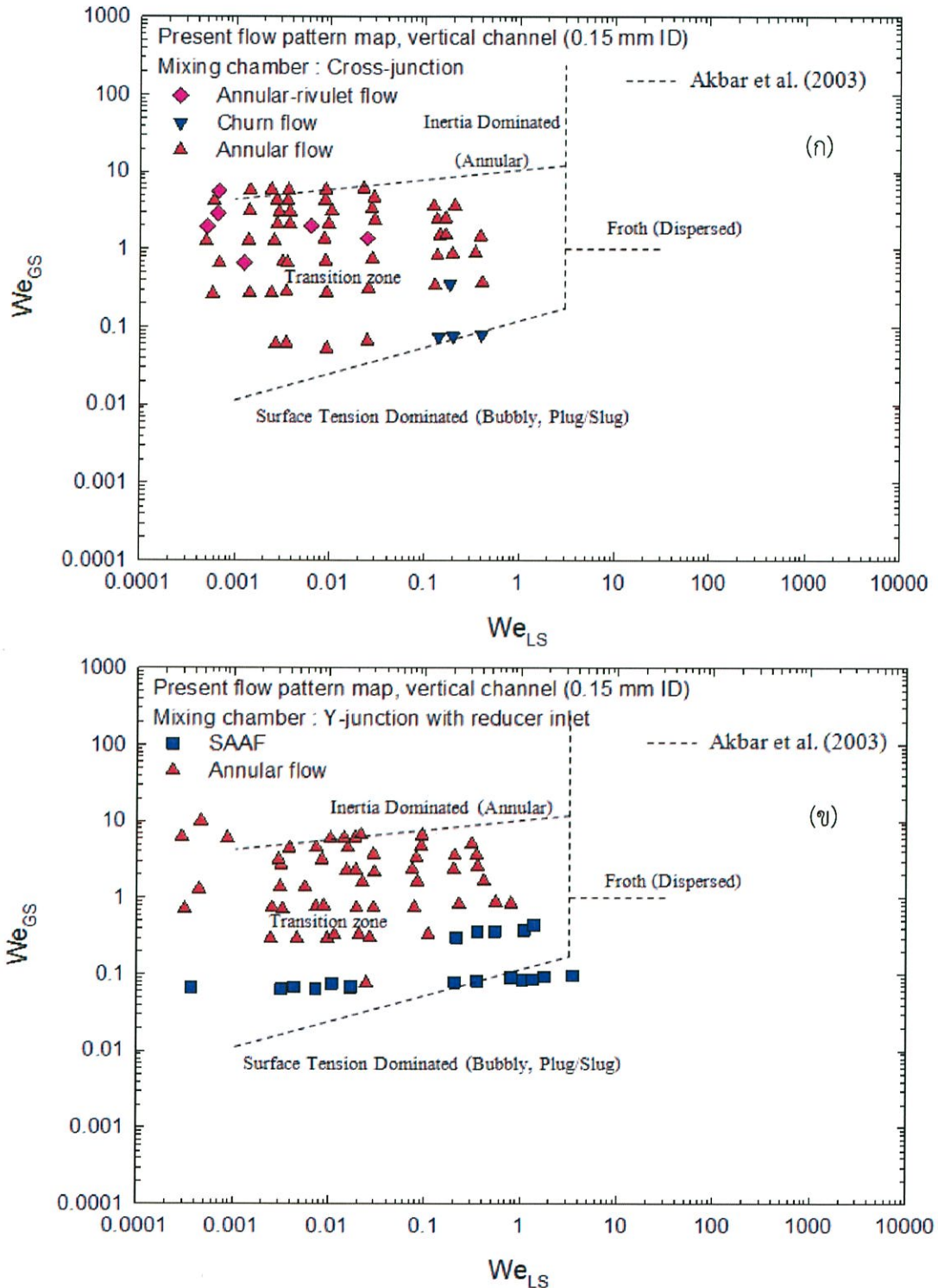


รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Baker (1954) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

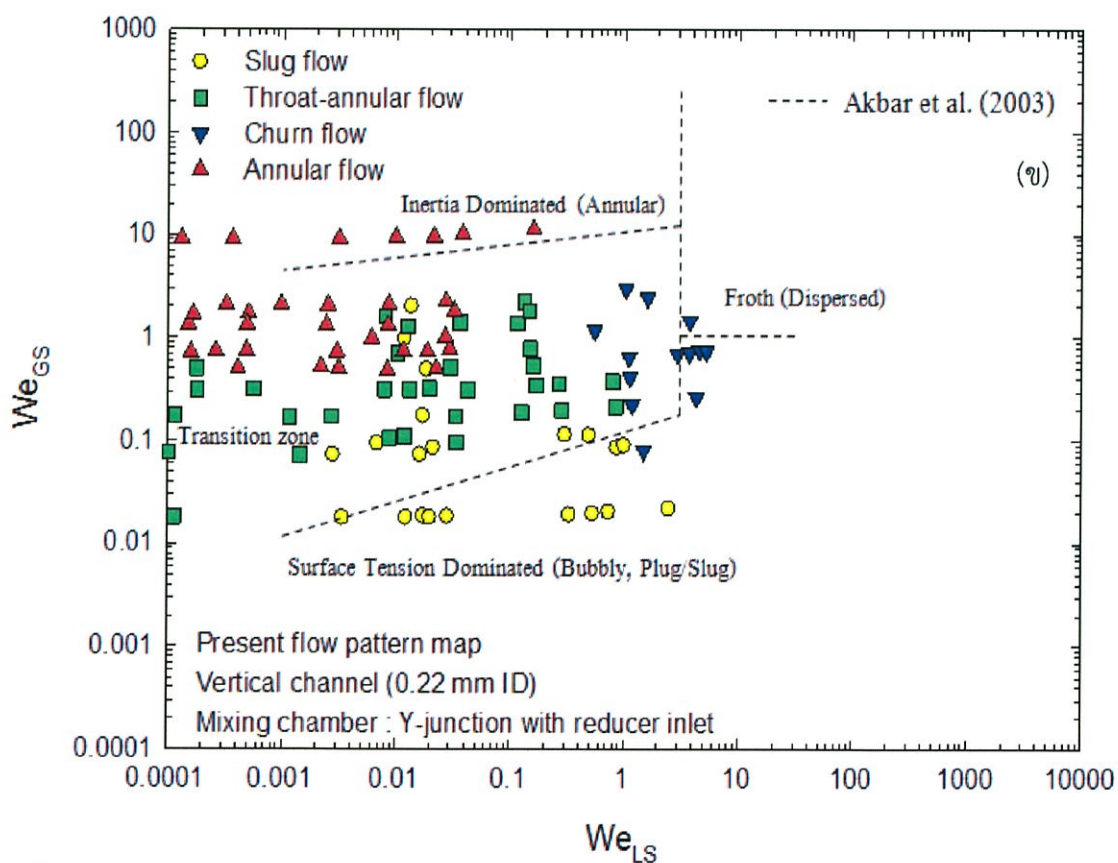
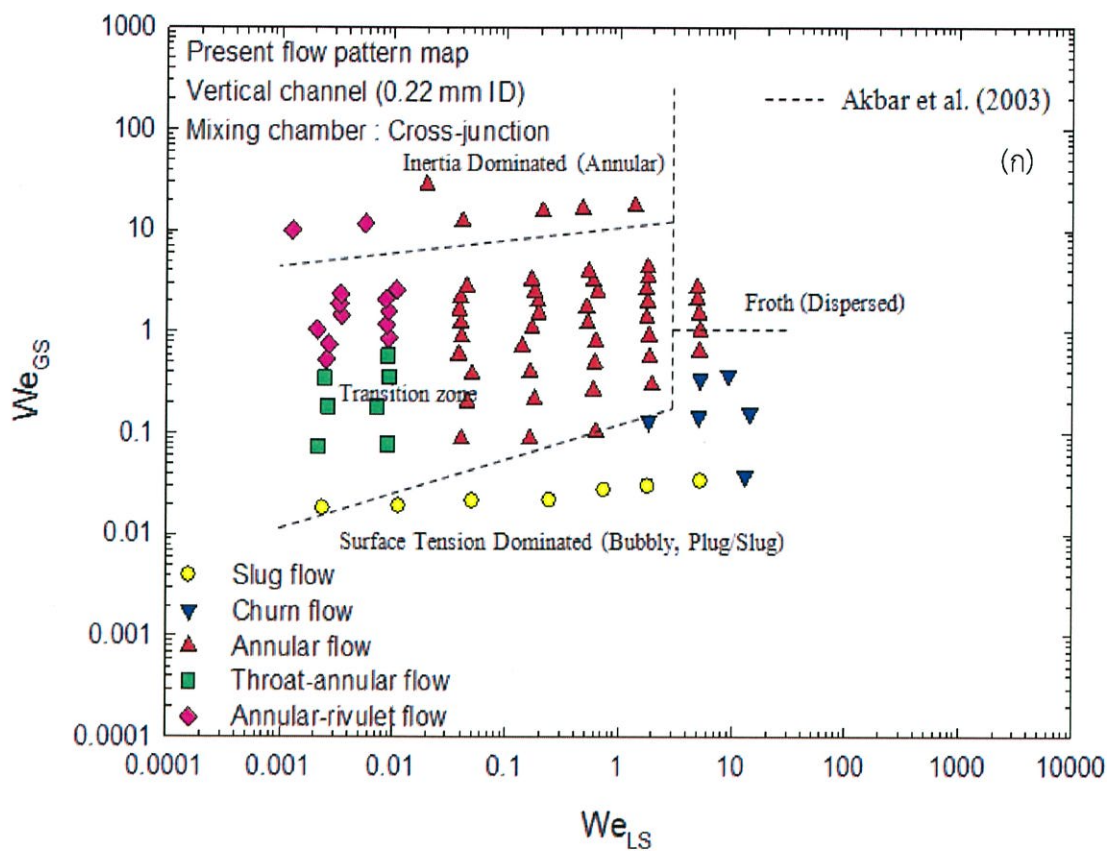


รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Baker (1954) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

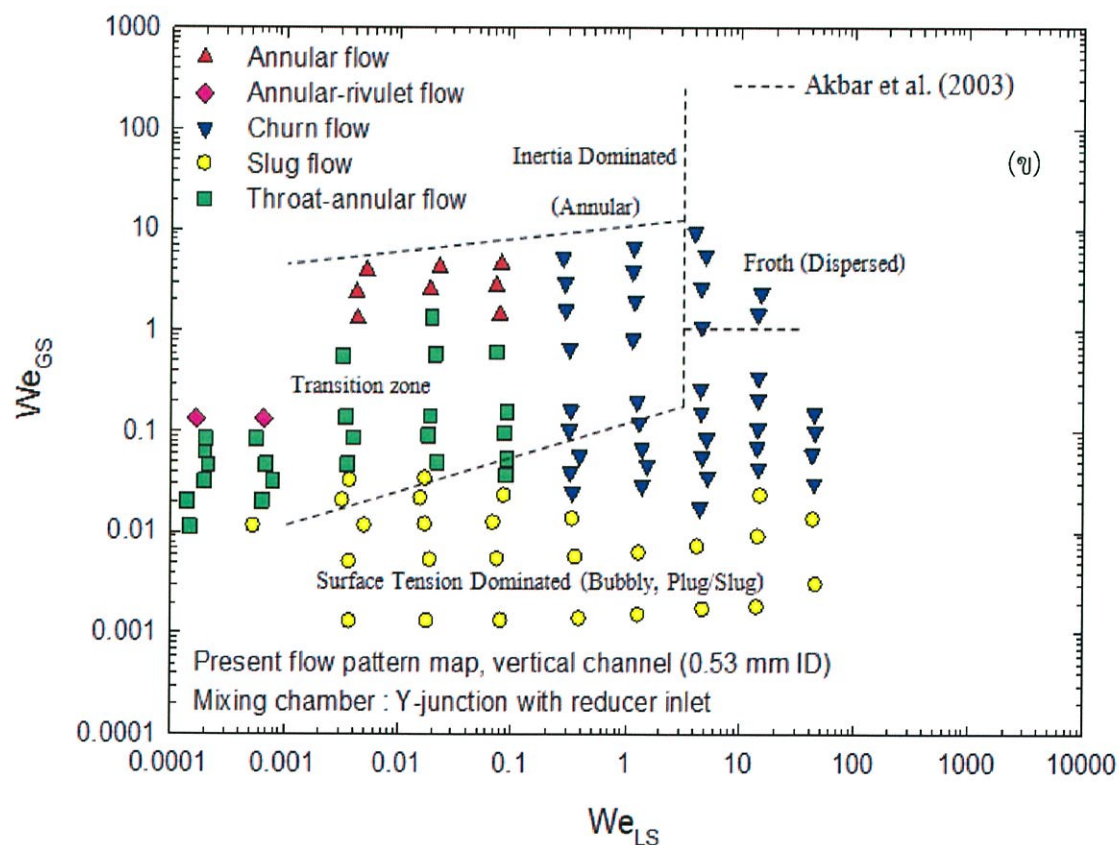
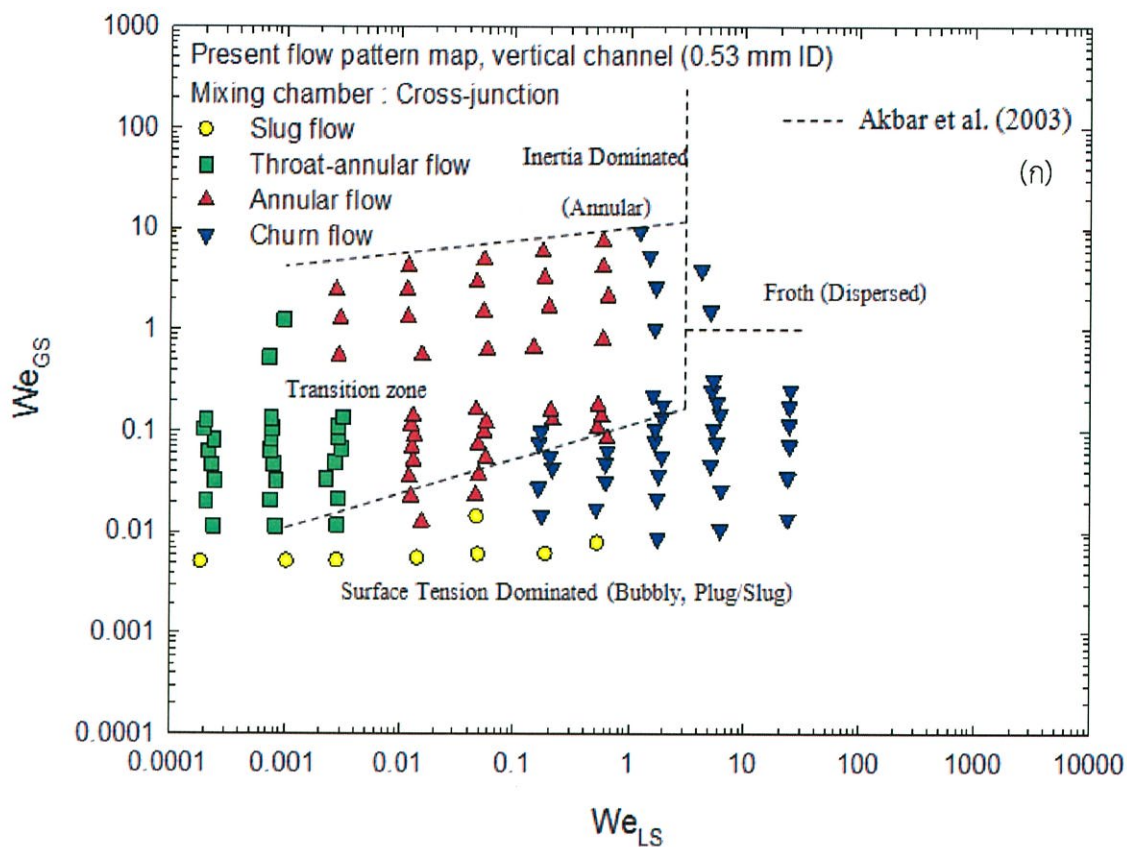
เนื่องจากเส้นแบ่งขอบเขตของ Akbar และคณะ (2003) เป็นเส้นแบ่งขอบเขตที่สร้างในท่อขนาดเล็ก ดังนั้นจึงสามารถทำนายรูปแบบการไหลได้ดีในส่วนจอร์บบนรูปแบบการไหลแบบ slug flow สำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 และ 0.22 มิลลิเมตร และยังสามารถทำนายรูปแบบการไหลที่ไม่มั่นคง(Unstable flow)สำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Akbar และ คณะ (2003) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Akbar และ คณะ (2003) (n) Cross-junction (x) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Akbar และ คณะ (2003)
 (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

ผลกระทบที่มีต่อรูปแบบการไหล นอกจากความแตกต่างของรูปทรงห้องผสม และการวางตัวของท่อ ที่นำเสนอก่อนหน้านี้ ยังพบว่าความแตกต่างของหน้าตัดท่อ ยังส่งผลกระทบต่อรูปแบบการไหลอีกด้วย เนื่องจากข้อมูลของ Wang และ คณะ (2012) ท่อที่ใช้มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม เส้นแบ่งขอบเขตของนักวิจัยท่านนี้จึงไม่สามารถทำนายได้ในงานวิจัยนี้ โดย Wang และ คณะ (2012) ได้เสนอเส้นแบ่งขอบเขตดังสมการต่อไปนี้

สำหรับเส้นแบ่งขอบเขตระหว่าง slug flow และ slug-annular flow

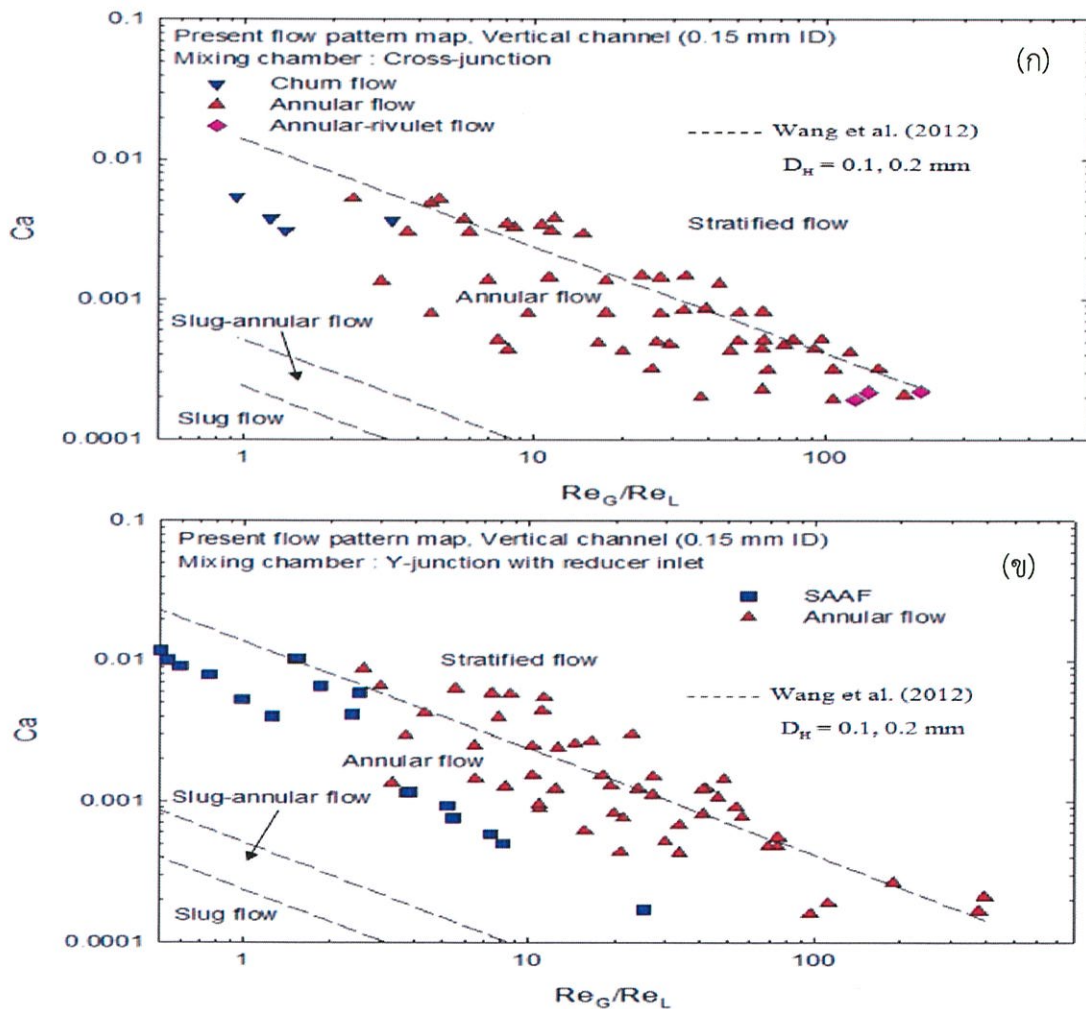
$$Ca = 4 \times 10^{-4} \left(\frac{\theta}{180^\circ} \pi \right) \left(\frac{Re_G}{Re_L} \right)^{-0.76} \tag{5.1}$$

สำหรับเส้นแบ่งขอบเขตระหว่าง slug-annular flow และ annular flow

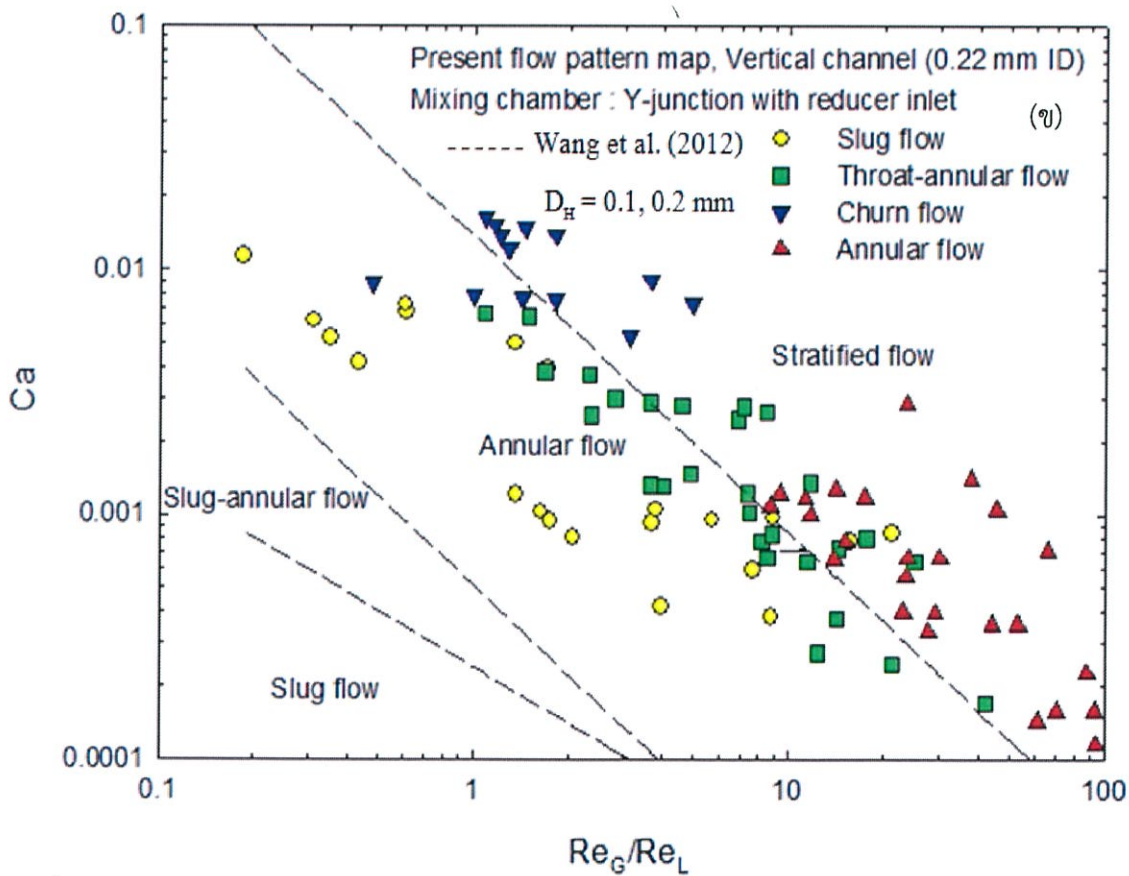
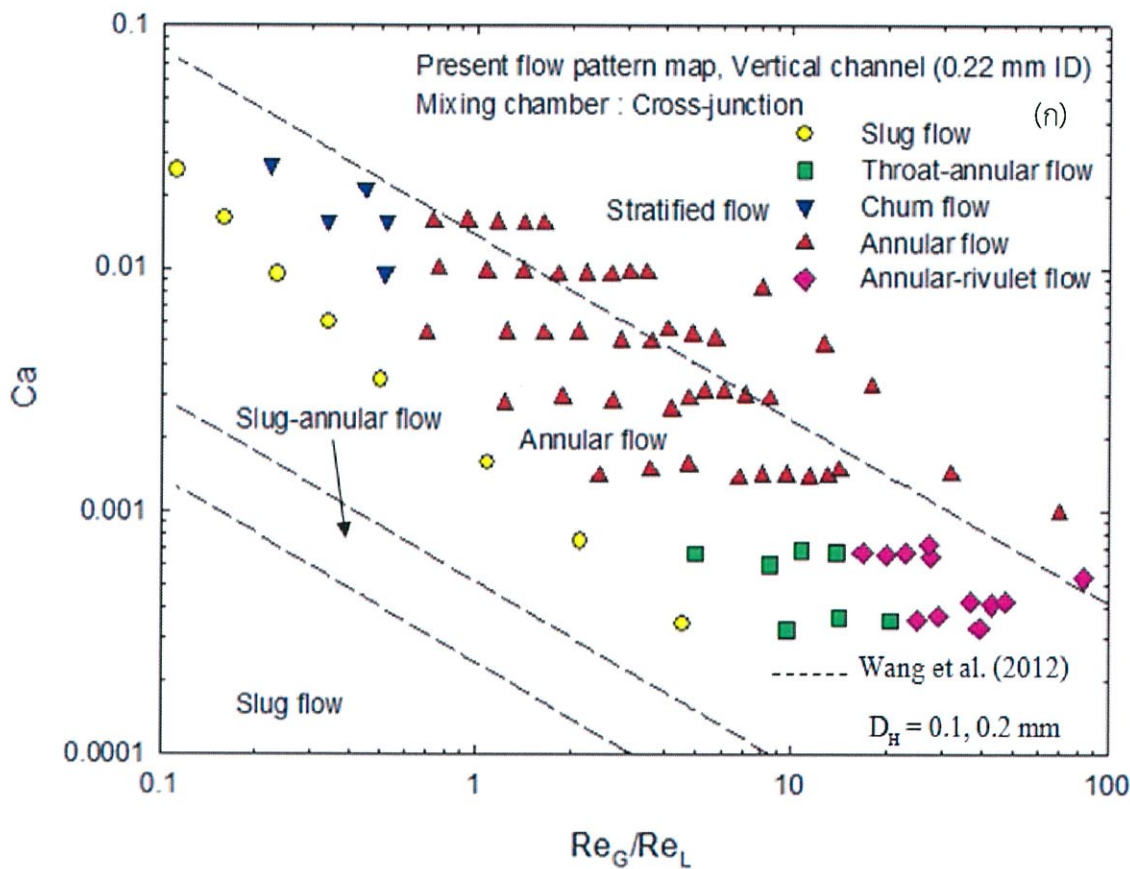
$$Ca = 8.6 \times 10^{-4} \left(\frac{\theta}{180^\circ} \pi \right) \left(\frac{Re_G}{Re_L} \right)^{-1.21} \tag{5.2}$$

สำหรับเส้นแบ่งขอบเขตระหว่าง annular flow และ stratified flow

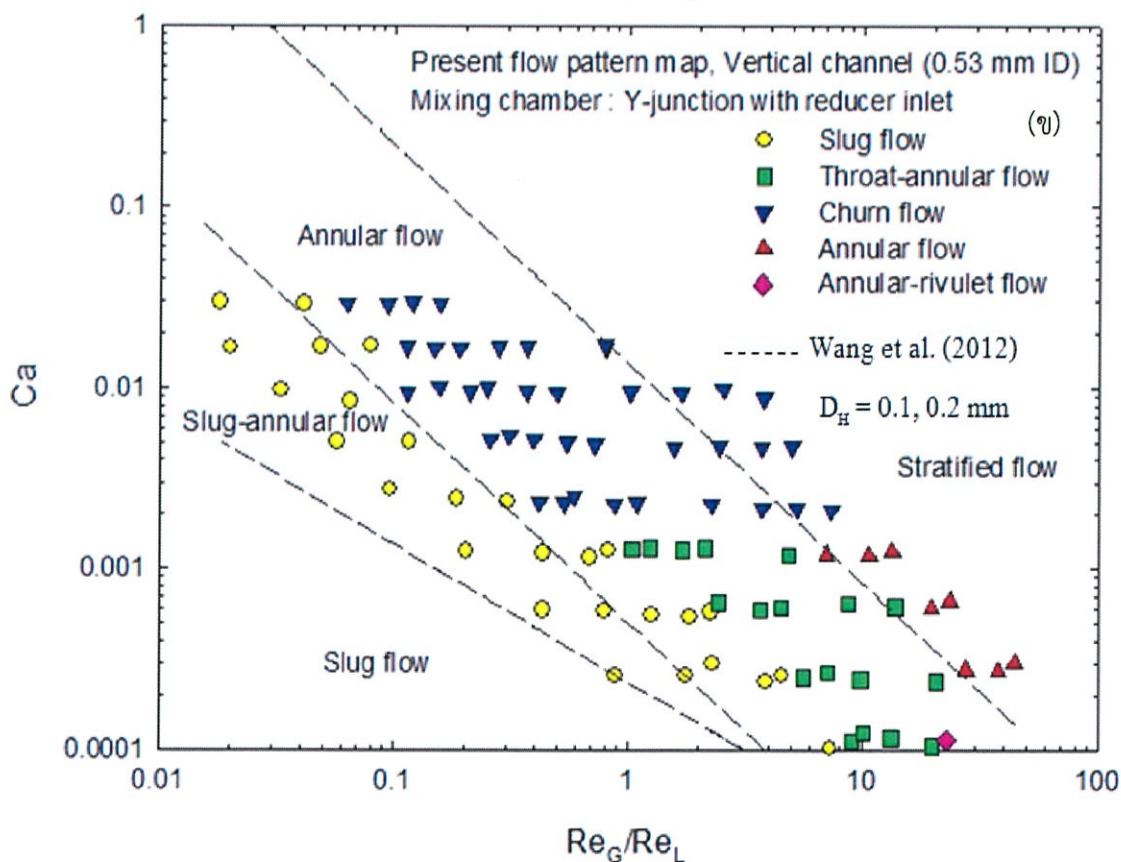
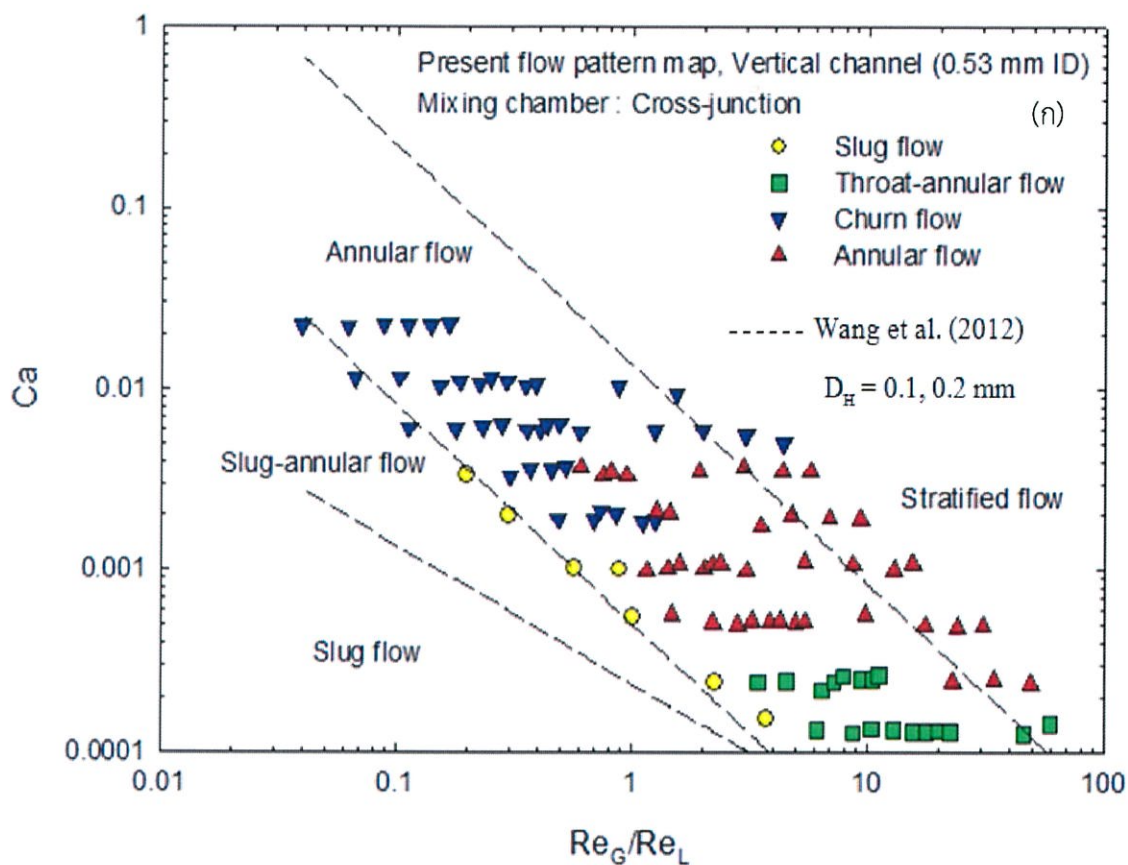
$$Ca = 2.3 \times 10^{-2} \left(\frac{\theta}{180^\circ} \pi \right) \left(\frac{Re_G}{Re_L} \right)^{-1.32} \tag{5.3}$$



รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Wang และ คณะ (2012) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



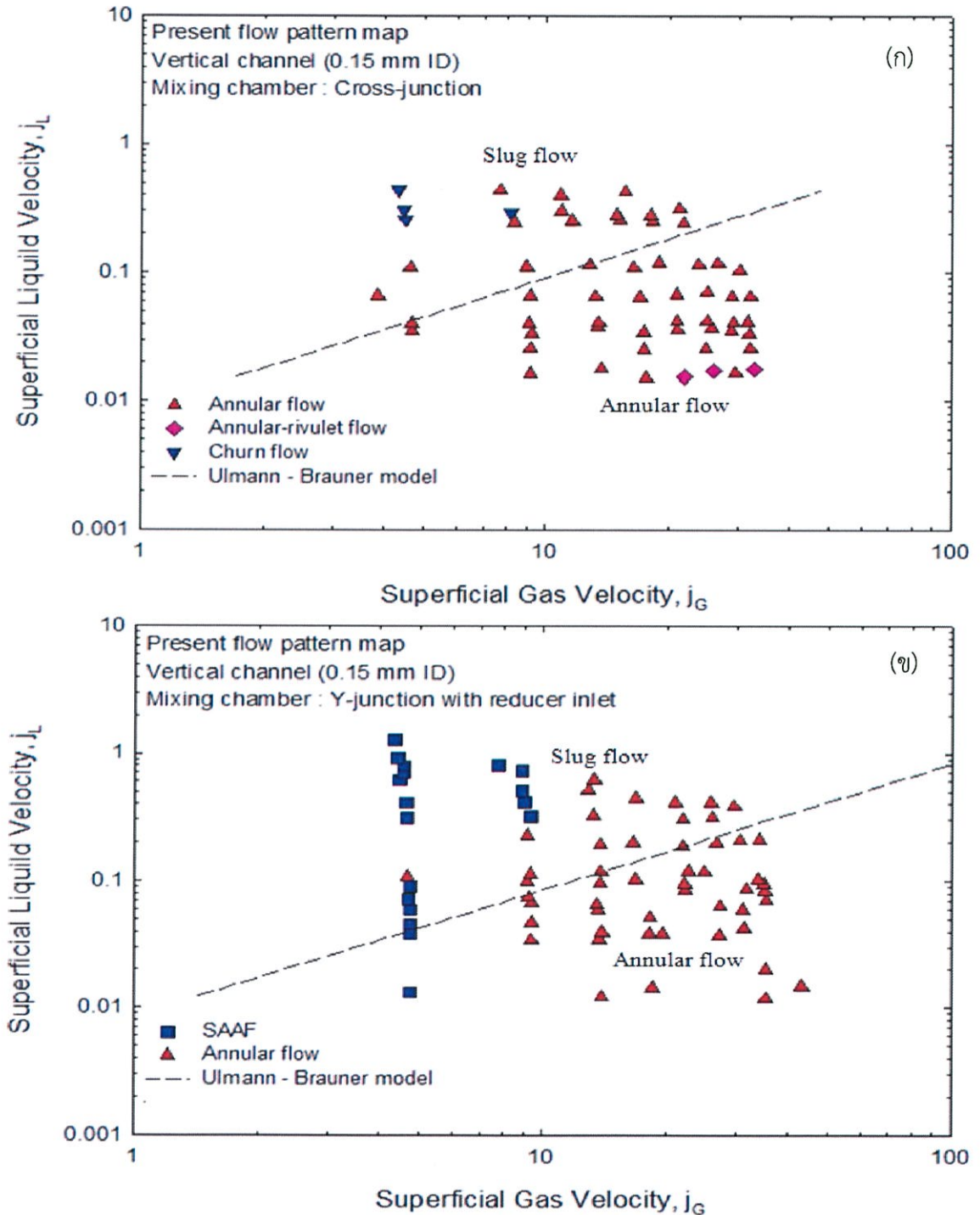
รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Wang และ คณะ (2012) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



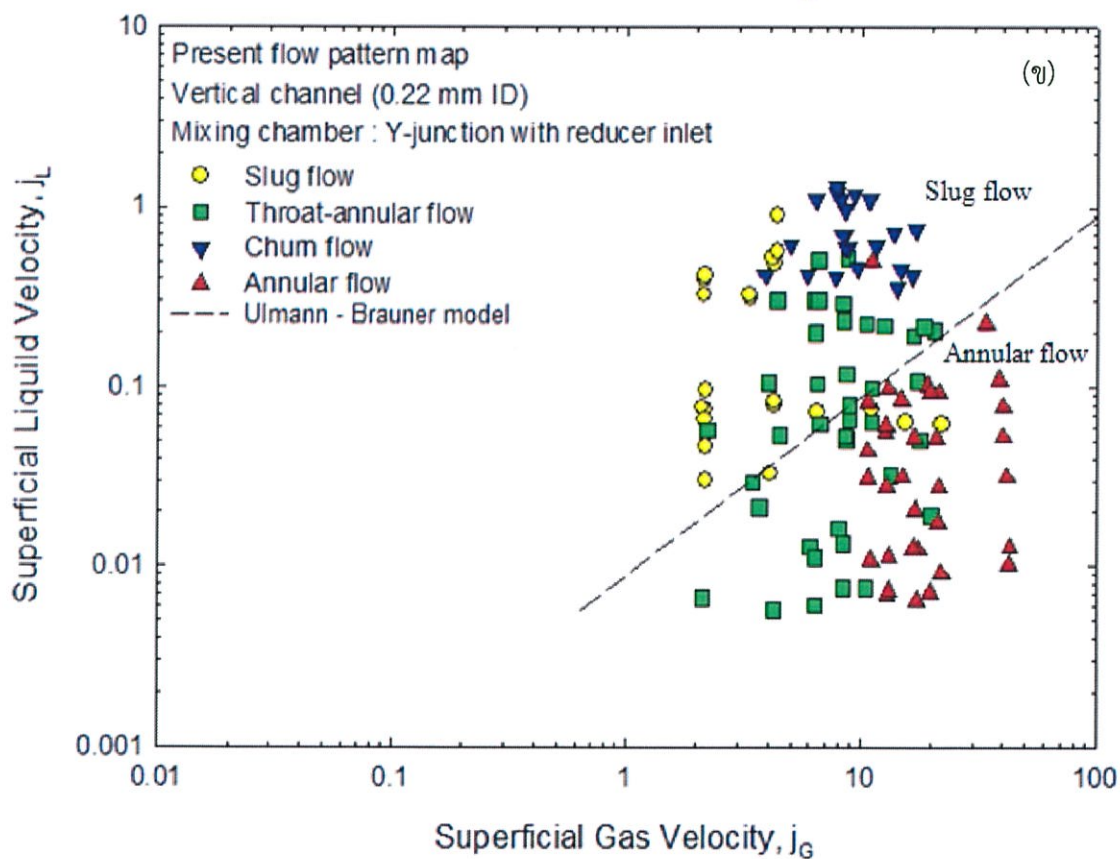
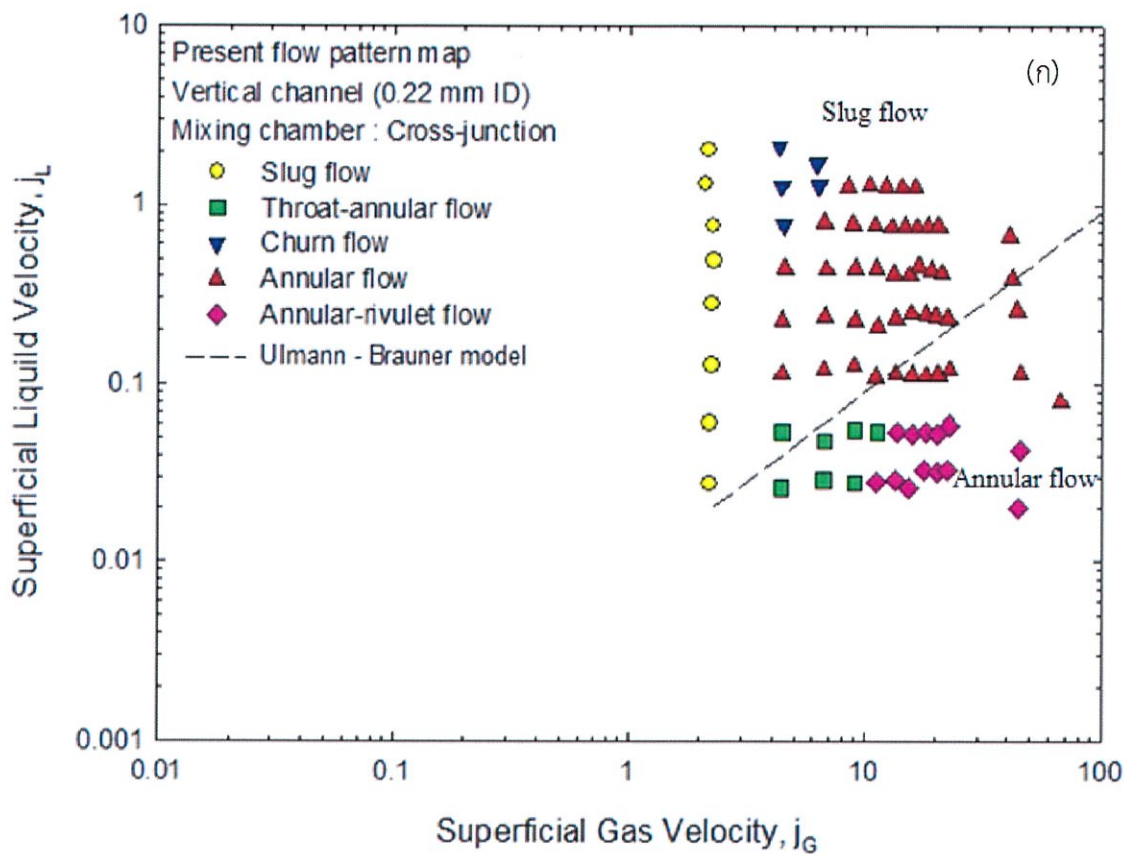
รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Wang และ คณะ (2012) (ก)
Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

จากการเปรียบเทียบเส้นแบ่งขอบเขตของแต่ละนักวิจัย พบว่าUllmann และ Brauner (2007) ทำนายได้ดีที่สุด เนื่องมาจากว่าเส้นแบ่งขอบเขตของนักวิจัยท่านนี้สร้างมาโดยวิธีการแบบใหม่ ซึ่งอยู่ในรูปของ Eötvös number, Eo_D ซึ่งคิดในส่วนของแรงลอยตัวและแรงตึงผิวดังสมการที่ (5.4)

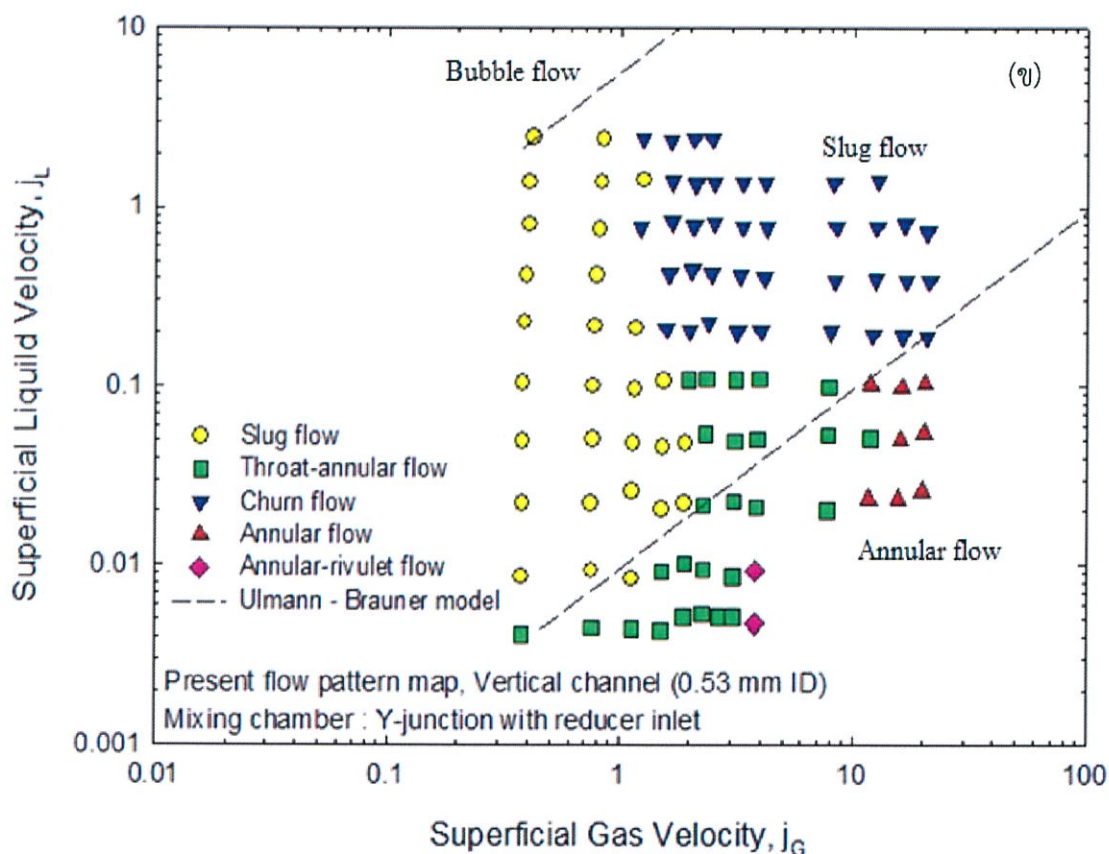
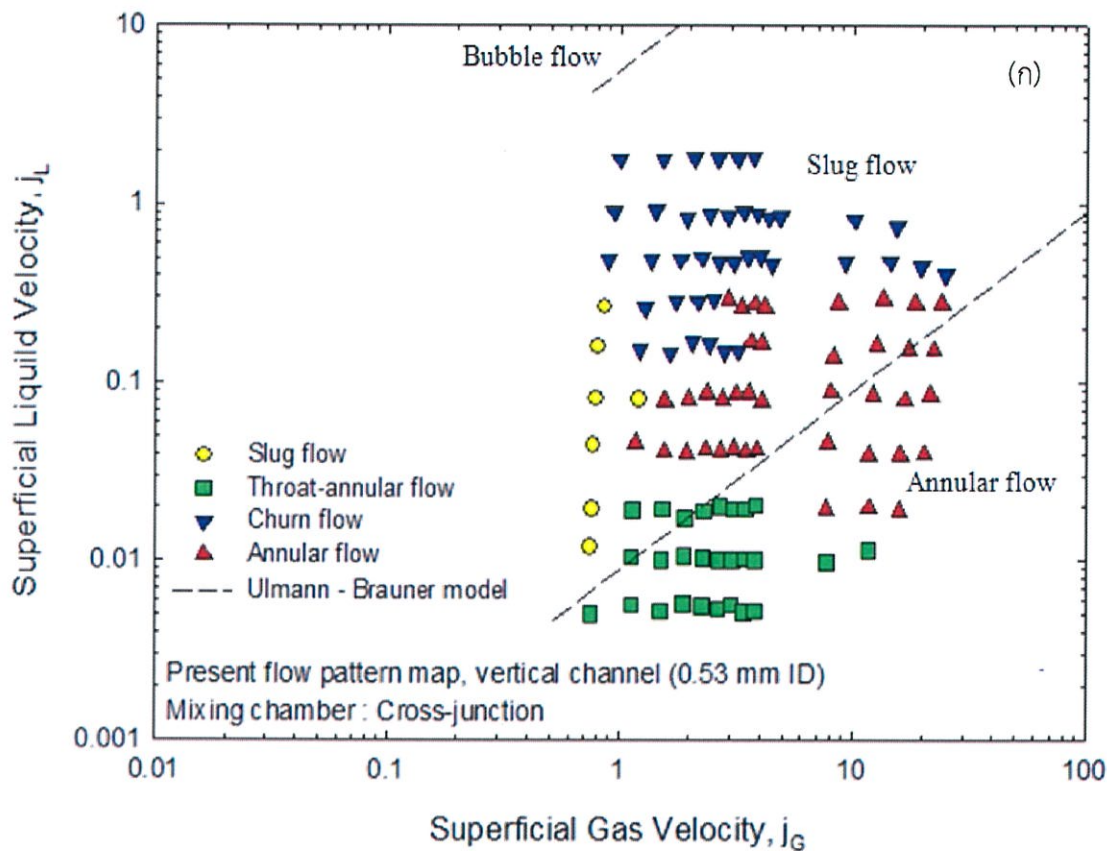
$$Eo_D = \frac{(\rho_L - \rho_G)gD^2}{8\sigma} \quad (5.4)$$



รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Ullmann และ Brauner (2007) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Ullmann และ Brauner (2007) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Ullmann และ Brauner (2007) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

5.2 สัดส่วนช่องว่าง(Void fraction)

สัดส่วนช่องว่างเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณความดันลด ในเทอมของแรงโน้มถ่วง และความแรงของการไหลสองสถานะของแก๊สและของเหลวในท่อต่างๆ วิธีการหาสัดส่วนช่องว่างมีหลากหลายวิธี ได้ถูกดำเนินการโดยนักวิจัยที่ผ่านมา เช่น วิธี quick-closing valves

อย่างไรก็ตามสำหรับท่อขนาดเล็กตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร ลงไป มีนักวิจัยแนะนำให้ใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ (Image analysis) จะถูกใช้ในการประมาณการหาค่าสัดส่วนช่องว่าง

งานในปัจจุบันสัดส่วนช่องว่างเป็นค่าเฉลี่ยโดยประมาณจาก 50-70 ภาพ การวิเคราะห์จากภาพถ่ายพิจารณาโดยสมมติว่าเป็นปริมาณทรงกระบอก สัดส่วนช่องว่างถูกวัดในหน่วยไมโครมิเตอร์ที่มีความถูกต้อง ± 0.05 มิลลิเมตร และผลของรัศมีความโค้งของท่อซึ่งมีการนำมาใช้ครั้งแรกโดย Kawahara และคณะ (2002) จะถูกนำมาพิจารณาสำหรับความไม่แน่นอนการประมาณ $\pm 13\%$ สำหรับท่อที่มีขนาด 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร และ $\pm 39\%$ สำหรับท่อที่มีขนาด 0.15 มิลลิเมตร

ข้อมูลสัดส่วนช่องว่างที่ได้รับจากท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ในห้องผสมแบบ Cross-junction จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้นของสมการที่ (5.5) ซึ่งสอดคล้องกับ homogeneous flow model

$$\alpha = \beta \quad (5.5)$$

ข้อมูลสัดส่วนช่องว่างที่ได้รับจากท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ในห้องผสมแบบ Y-junction with reducer Inlet จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้นของสมการที่ (5.6)

$$\alpha = 0.563\beta + 0.097 \quad (5.6)$$

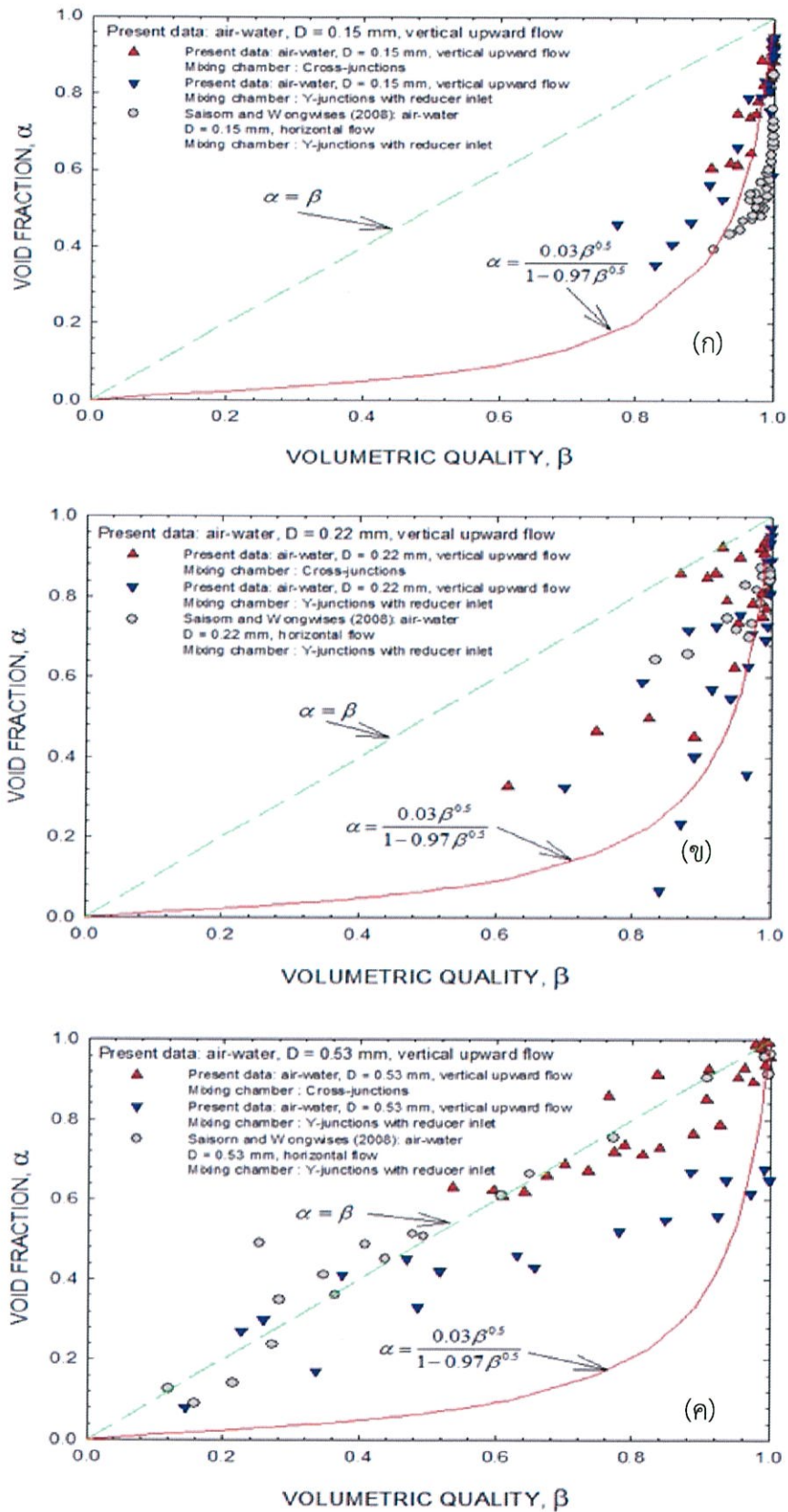
สำหรับสัดส่วนช่องว่างที่ได้รับจากท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 และ 0.15 มิลลิเมตร ในห้องผสมแบบ Cross-junction และ Y-junction with reducer Inlet สัดส่วนช่องว่างจากการวัดพบว่าไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้น แต่ข้อมูลมีความสัมพันธ์อย่างดีกับสมการที่ (5.7) ซึ่งได้รับการเสนอโดย Kawahara และคณะ (2002) ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีสาเหตุหลักมาจากการปรากฏตัวของรูปร่างการไหล gas core ที่มีค่า slip ratios มาก

$$\alpha = \frac{0.03\beta^{0.5}}{1 - 0.97\beta^{0.5}} \quad (5.7)$$

ในสมการ (5.5) - (5.7) สัดส่วนช่องว่างแทนด้วย α และคุณภาพไอเชิงปริมาตรจะถูกแทนด้วย β

จากการเปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างที่ได้จากการทดลองซึ่งมีห้องผสมและทิศทางการไหลแตกต่างกัน พบว่าผลกระทบดังกล่าวจะมีน้อยลงเมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.29

ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างสัดส่วนช่องว่างและคุณภาพไอเชิงปริมาตรจะถูกสังเกตสำหรับท่อที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 5.29 ข้อมูลสัดส่วนช่องว่างเทียบกับคุณภาพไอเชิงปริมาตรของท่อไมโครเซนแนล แนวนอน ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (ก) 0.15 มิลลิเมตร (ข) 0.22 มิลลิเมตร (ค) 0.53 มิลลิเมตร

5.3 ความดันลด (Pressure drop)

ในงานปัจจุบันการวัดความดันลดของการไหลสองสถานะในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร จะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ความดันลดลงของการไหลสองสถานะในท่อซึ่งวางตัวในแนวตั้งจะแสดงโดยสมการความสมดุลต่อไปนี้ สมการที่ (5.8) ถูกนำไปใช้สำหรับท่อที่เชื่อมต่อกับห้องผสมแบบ Y-junction และสมการที่ (5.9) ถูกนำไปใช้สำหรับท่อที่เชื่อมต่อกับห้องผสมแบบ Cross-junction

$$\Delta P_{\text{exp}} = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_c + \Delta P_g \quad (5.8)$$

$$\Delta P_{\text{exp}} = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_g \quad (5.9)$$

เมื่อ ΔP_f คือ ความดันลดลงจากเสียดทาน ΔP_a คือ ความดันลดลงจากความเร่ง ΔP_c คือ ความดันลดลงจากการหดตัวฉับพลัน และ ΔP_g คือ ความดันลดลงจากแรงโน้มถ่วง ทั้ง 3 ความดันลด สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P_a = G^2 \left\{ \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_L} \right]_{\text{outlet}} - \left[\frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_L} \right]_{\text{inlet}} \right\} \quad (5.10)$$

$$\Delta P_c = \frac{G^2}{2\rho_L} \left[\left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 + \left(1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) x \right] \quad (5.11)$$

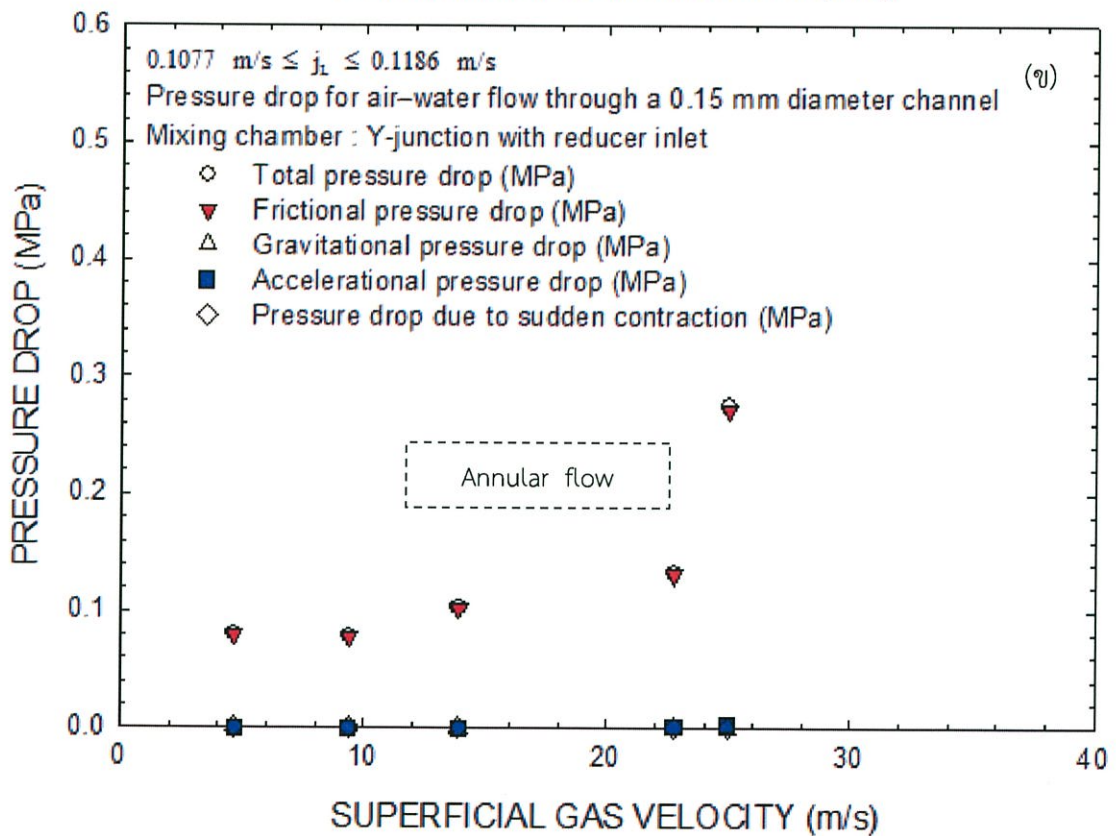
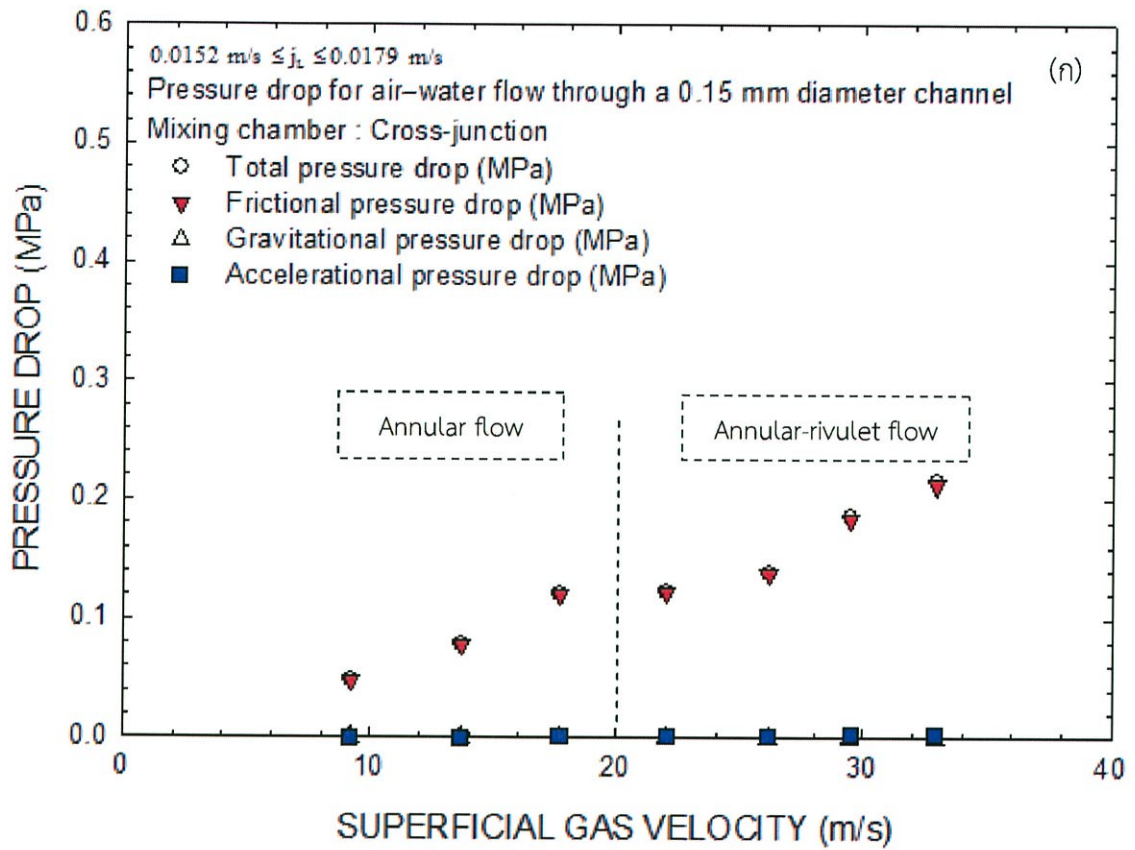
$$\Delta P_g = gL \sin \theta [\alpha \rho_G + (1-\alpha) \rho_L] \quad (5.12)$$

ในสมการ (5.10) และ (5.11), x คือ mass quality, α คือ สัดส่วนช่องว่าง, G คือ mass velocity, C_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการหดตัวซึ่งสามารถได้รับโดย Chisholm (1983) ดังแสดงในสมการที่ (5.13)

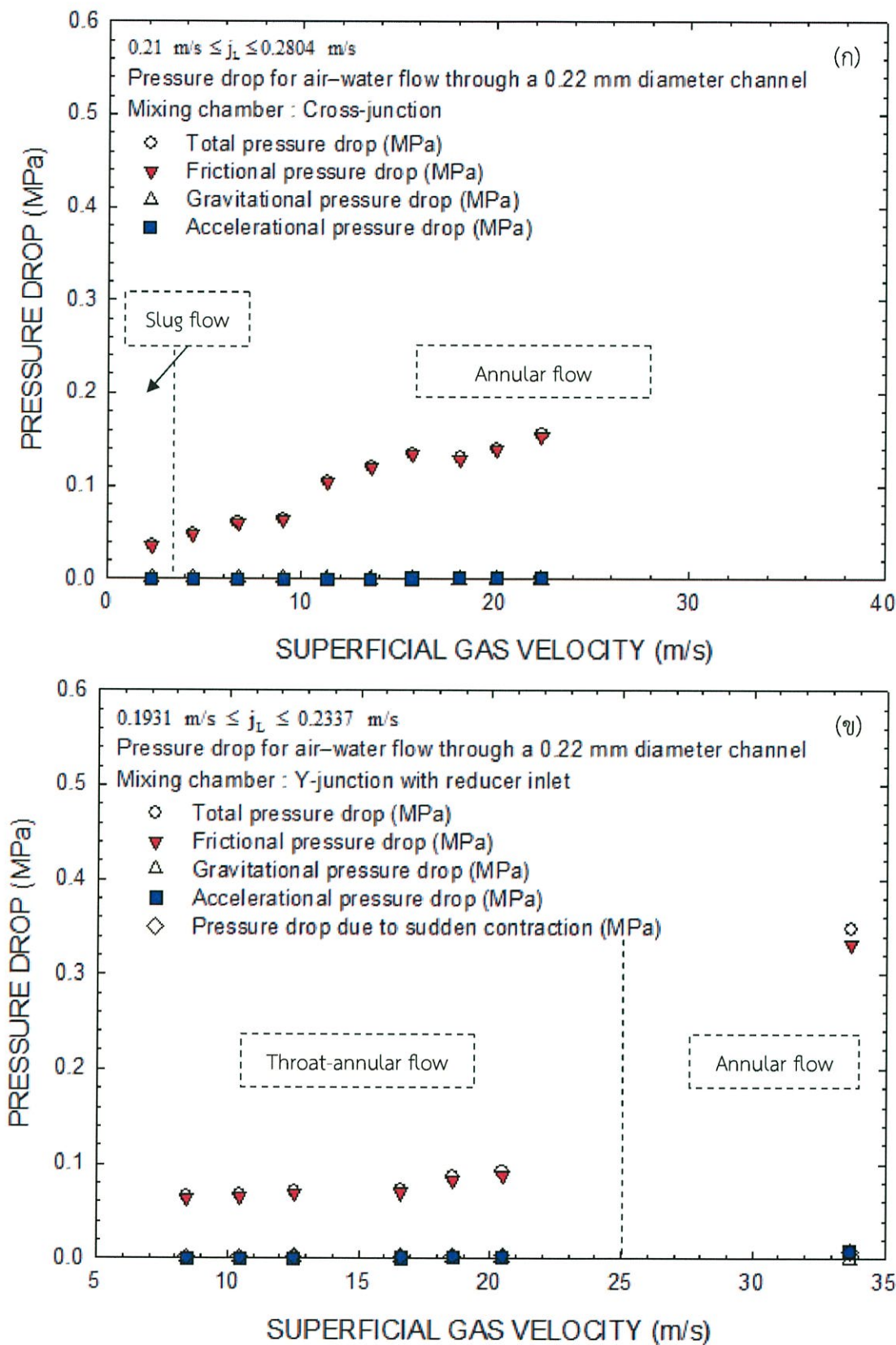
$$C_c = \frac{1}{0.639 \left[1 - \left(\frac{1}{\gamma} \right) \right]^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (5.13)$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของส่วนทดสอบ (Test section) กับห้องผสม

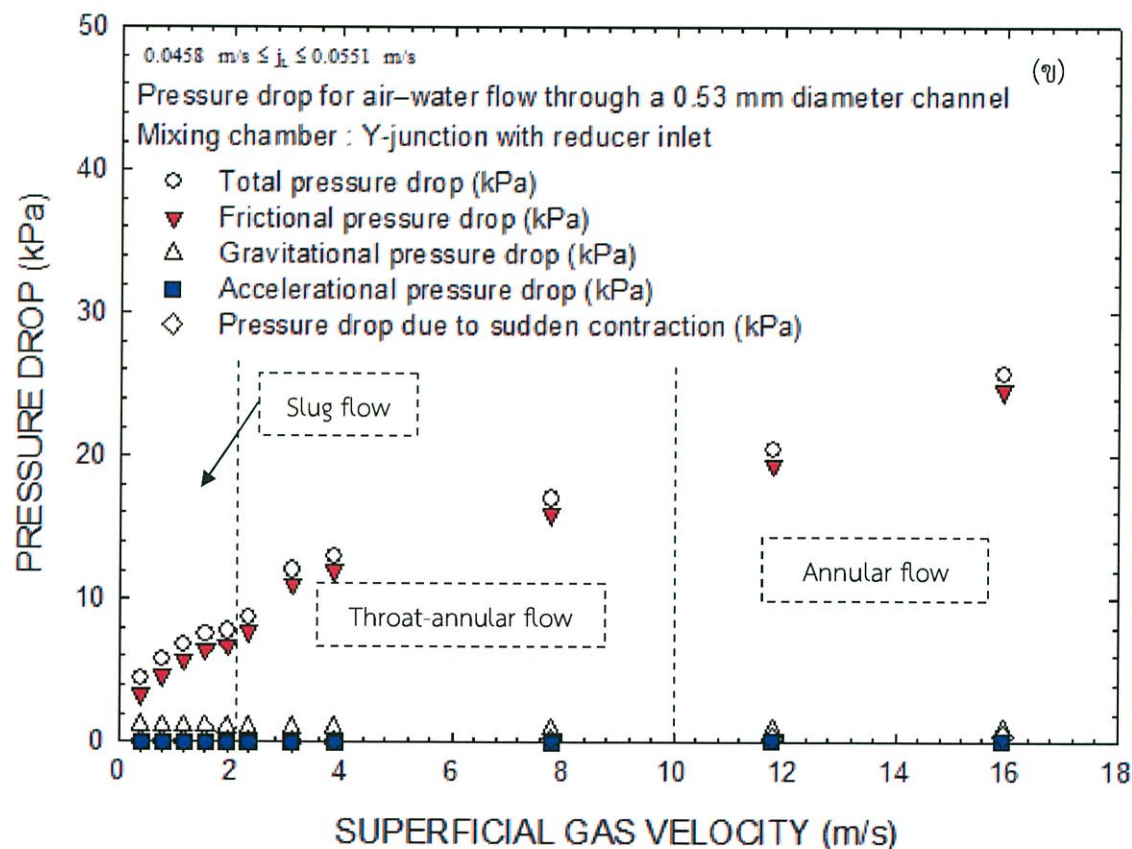
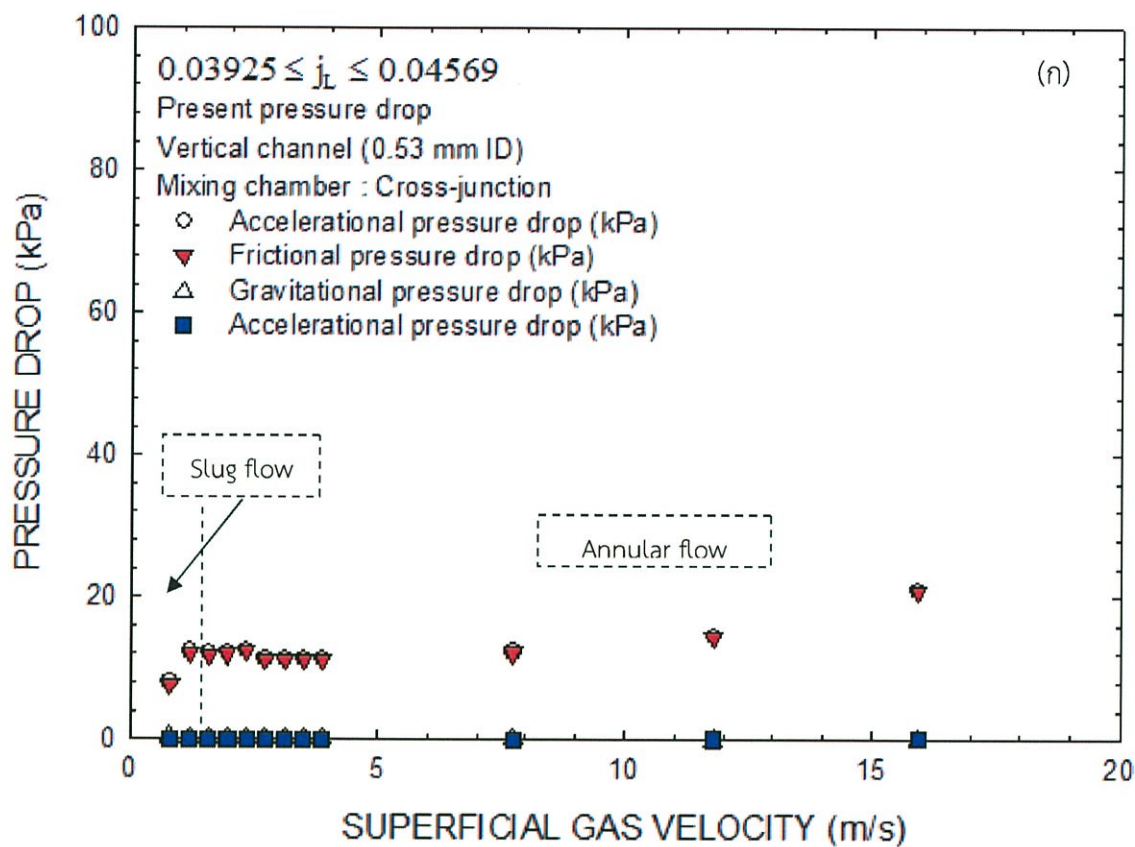
ความดันลดจากความเสียดทานในการศึกษาครั้งนี้จะถูกคำนวณโดยการลบเทอมของความเร่งเทอมของแรงโน้มถ่วง และเทอมของการหดตัวฉับพลันจากความดันลดที่ได้จากการวัด จากการคำนวณแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของความดันลดสำหรับการไหลของน้ำ-อากาศในไมโครเซนแนลแนวตั้ง พบว่าความดันลดจากเสียดทานมีค่ามากกว่าทั้ง 3 ความดันลด ดังแสดงให้เห็นภาพดังรูปที่ 5.30-5.32 (ก) ห้องผสมแบบ Cross-junction, (ข) ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.30 ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.31 ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



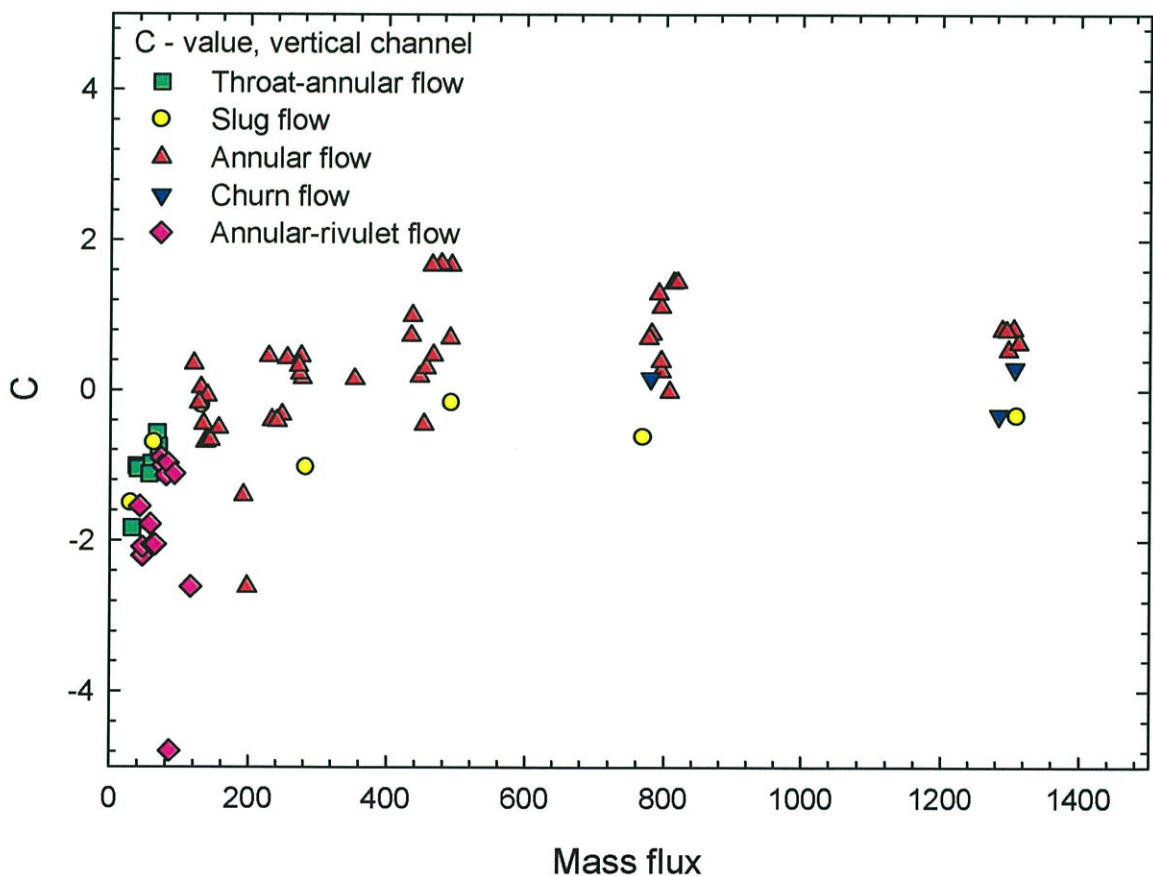
รูปที่ 5.32 ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

ค่า C คือ พารามิเตอร์ที่ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Chisholm (1967) ซึ่งถูกกำหนดโดยลักษณะการไหลของของเหลว และของแก๊สว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) หรือการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) แล้วจึงพิจารณาหาค่า c ที่เหมาะสมจากตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์โดย Chisholm (1967)

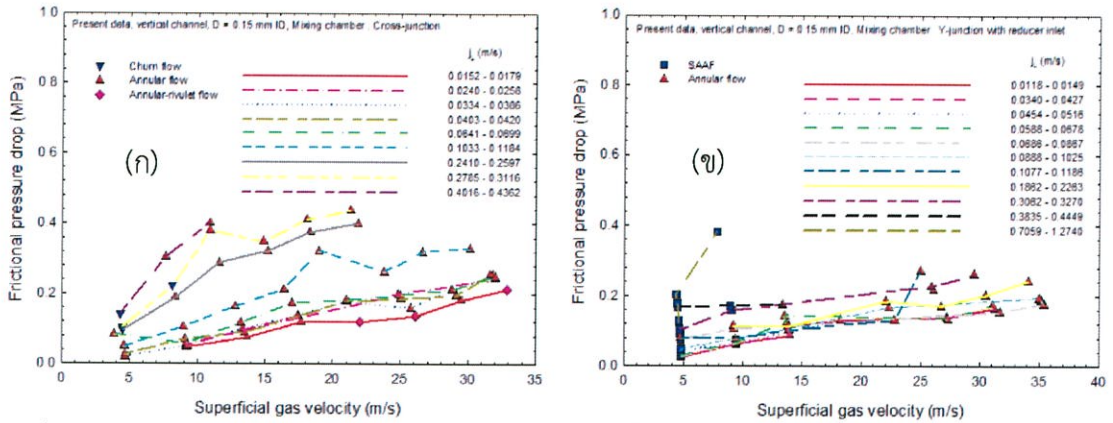
Liquid	Gas	คำย่อ	c
turbulent	turbulent	tt	20
laminar	turbulent	lt	12
turbulent	laminar	tl	10
laminar	laminar	ll	5

ความหมายในเชิงฟิสิกส์ของค่า c คือ ค่าที่บอกผลของการinteractionระหว่างแก๊สและของเหลว ยังมีค่ามากยิ่งเกิดการinteractionระหว่างแก๊สและของเหลวมาก เช่น ในตารางที่ 5.1 จะพบว่า ในช่วง turbulentกับturbulent ค่า c ก็จะมีค่าสูงเพราะฉะนั้นระดับความรุนแรงของการinteractionจะมีมาก ส่วนในช่วง laminarกับlaminar ค่า c จะมีค่าต่ำเพราะฉะนั้นระดับความรุนแรงของการinteractionจะมีน้อย

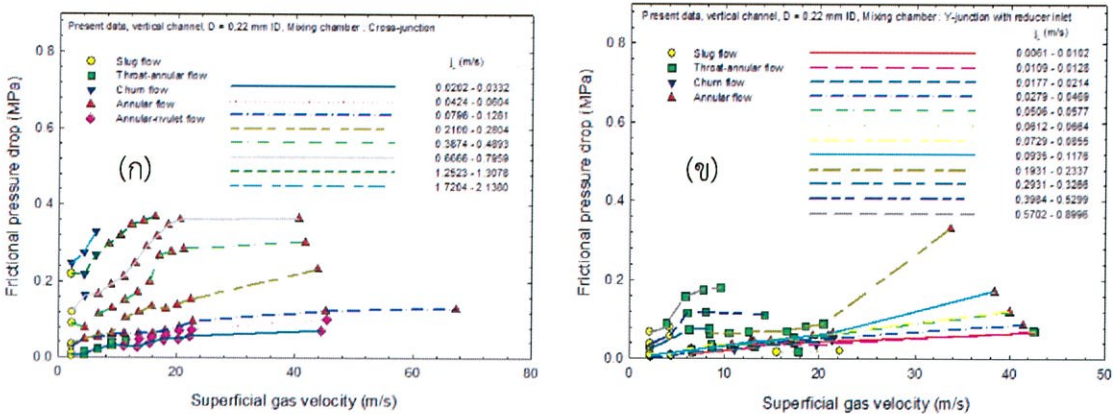


รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบค่า c ที่ได้จากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน

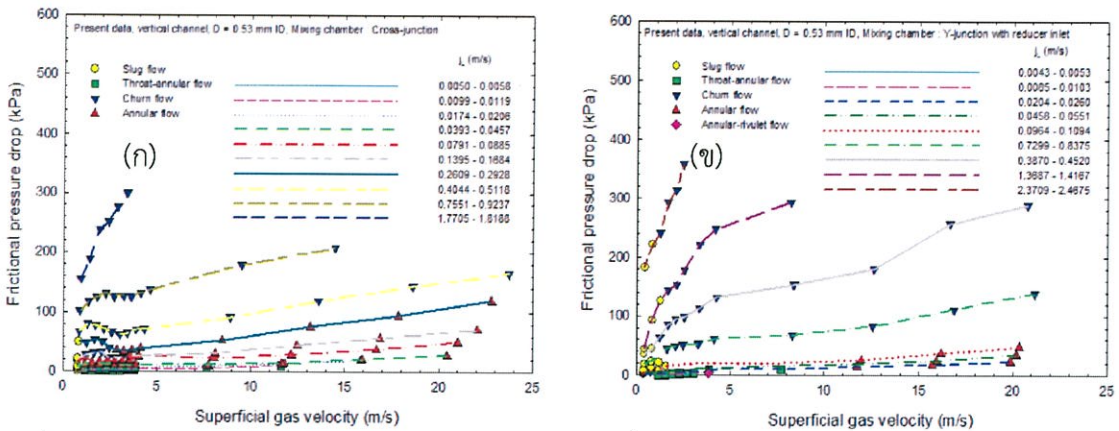
จากผลการทดลองพบว่ารูปแบบการไหลที่มีความดันตกที่มีค่าสูงที่สุด คือ รูปแบบการไหลแบบ annular flow ดังแสดงในรูปที่ 5.34-5.36 เพราะว่ารูปแบบการไหลแบบ annular flow มีค่า c มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.34 ส่วนประกอบความดันตกจากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันของสำหรับท่อไมโครแชนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

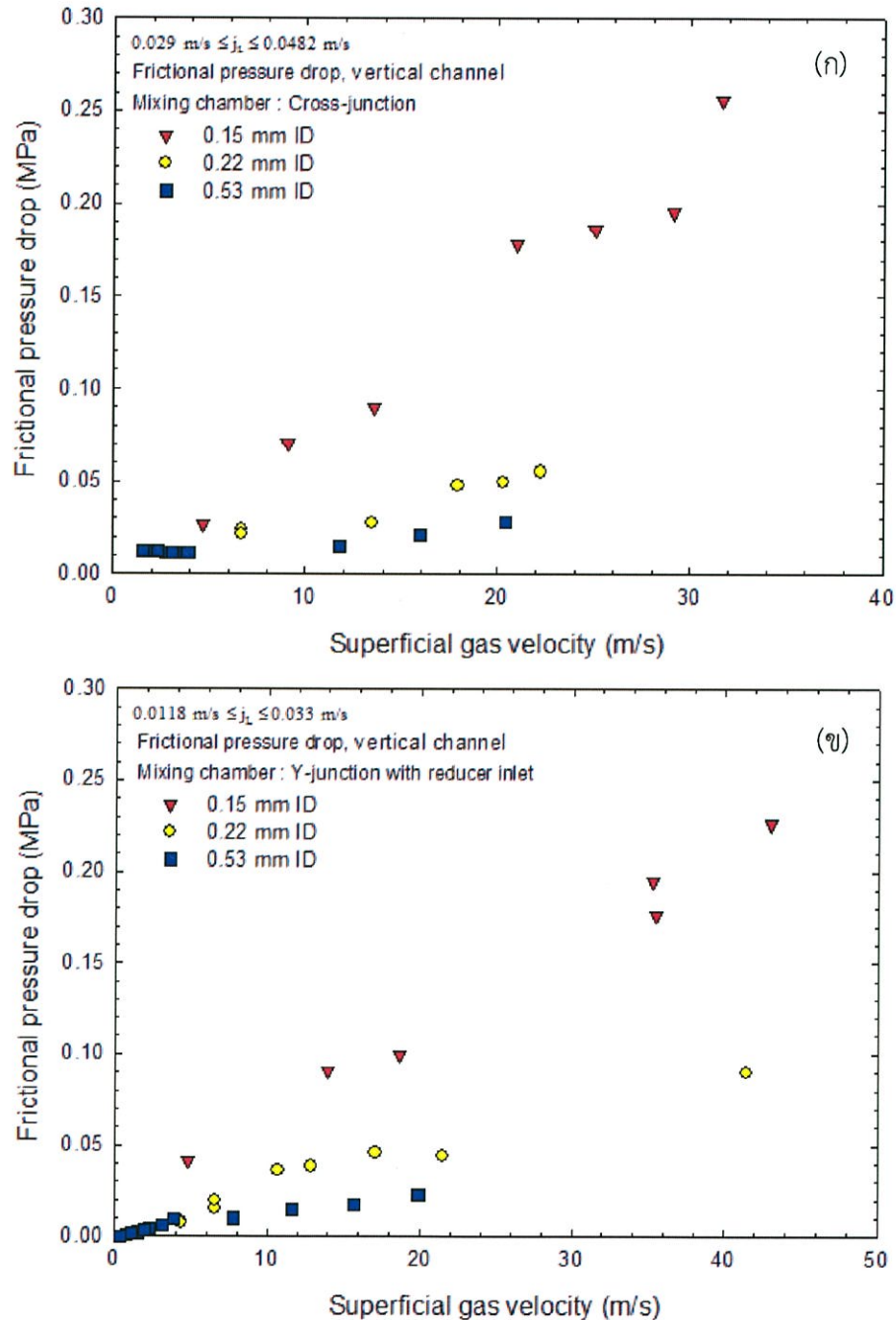


รูปที่ 5.35 ส่วนประกอบความดันตกจากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันของสำหรับท่อไมโครแชนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



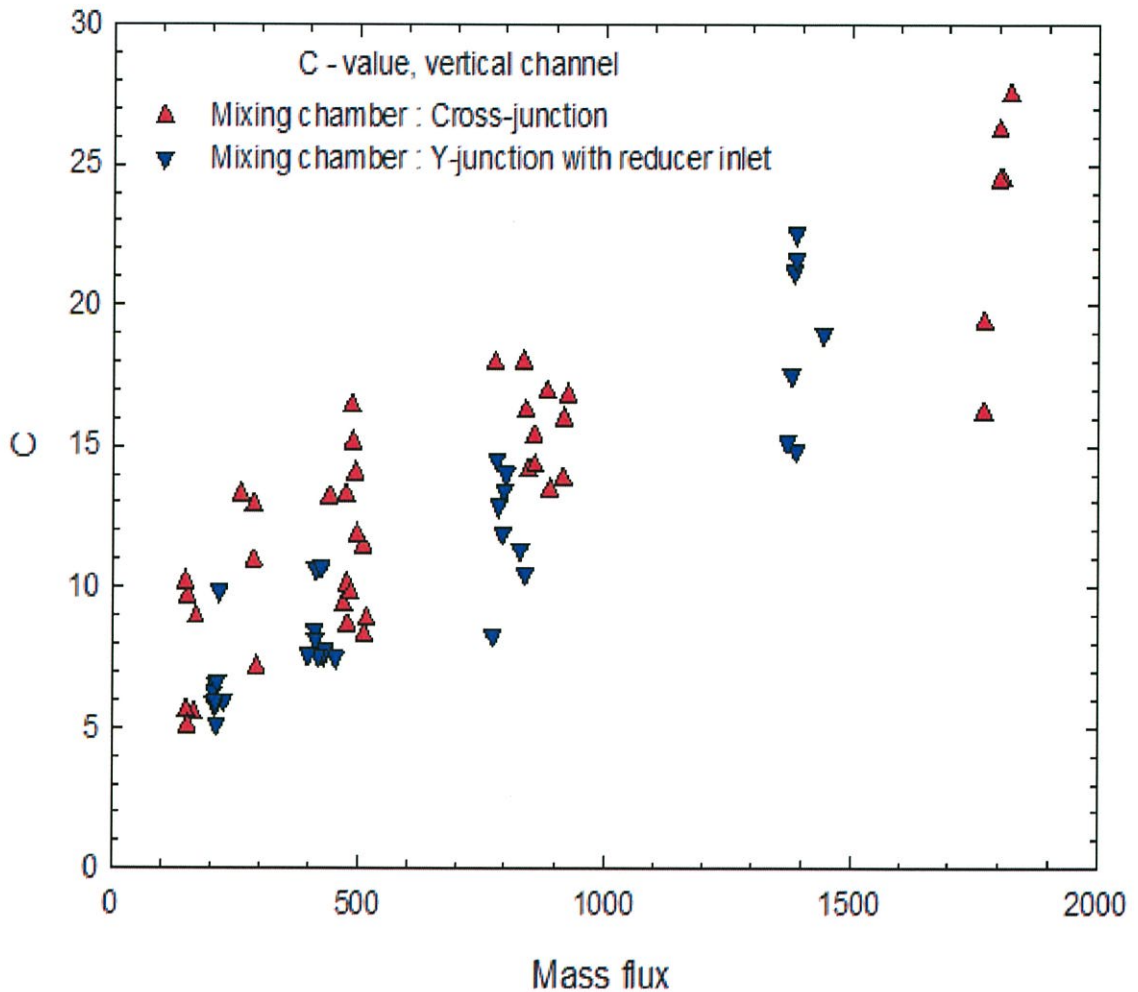
รูปที่ 5.36 ส่วนประกอบความดันตกจากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันของสำหรับท่อไมโครแชนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

ในรูปที่ 5.37 เป็นการเปรียบเทียบความดันลดจากแรงเสียดทานสำหรับท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร พบว่าท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มีค่าความดันลดจากแรงเสียดทานมากที่สุด และในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มีค่าความดันลดจากแรงเสียดทานน้อยที่สุด เนื่องมาจากผลของการสูญเสียหลัก การสูญเสียขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในยิ่งมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ความดันลดจากแรงเสียดทานมีค่ามากขึ้น



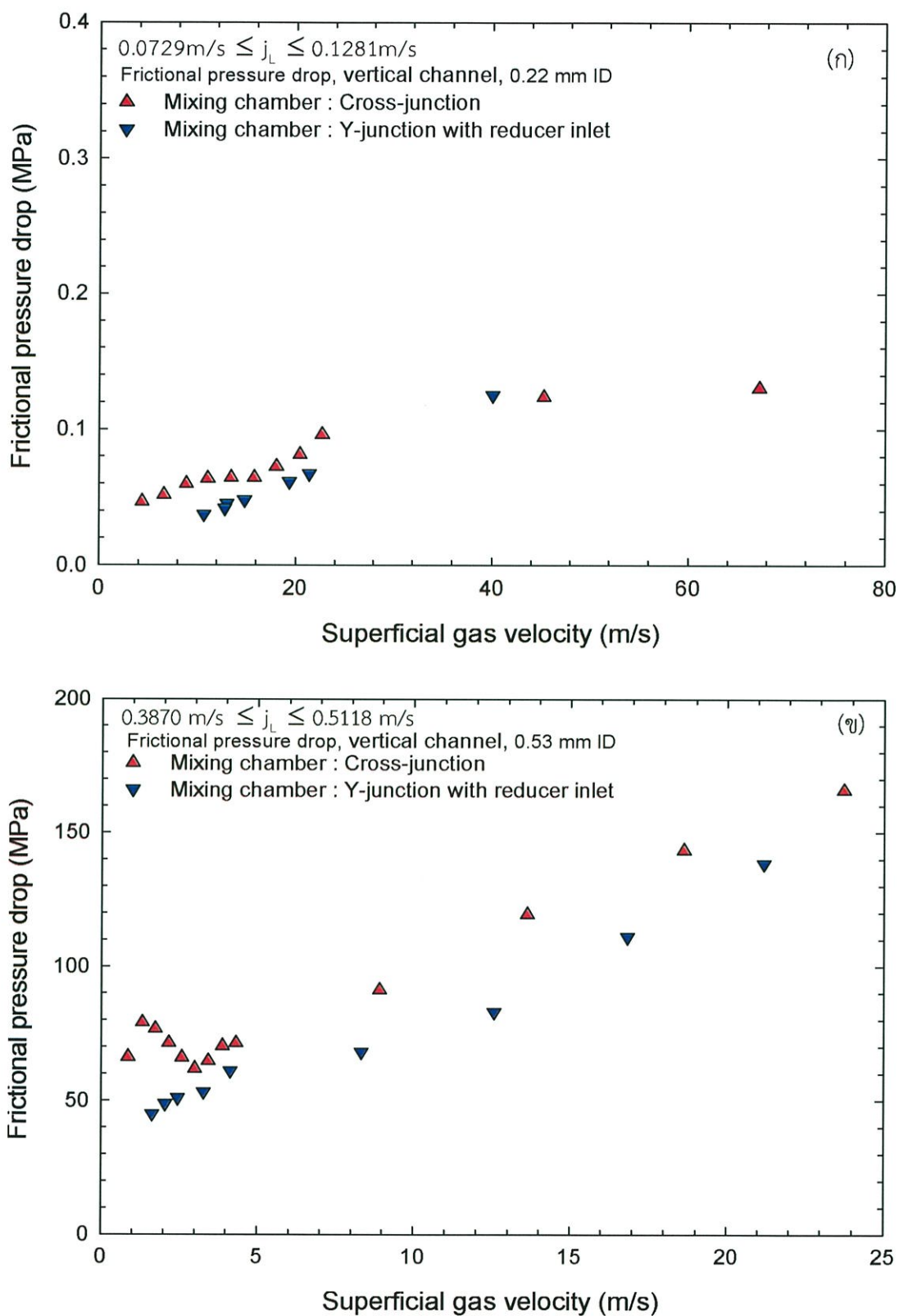
รูปที่ 5.37 ความดันลดจากแรงเสียดทานสำหรับท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

ในรูปที่ 5.38 เป็นการเปรียบเทียบค่า c ที่ได้จากห้องผสมแบบ Cross-junction กับห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ซึ่งพบว่าในห้องผสมแบบ Cross-junction มีค่า c ที่สูงกว่าในห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.38 เปรียบเทียบค่า c ที่ได้จากห้องผสมแบบ Cross-junction กับห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet

จากการเปรียบเทียบความดันลดจากแรงเสียดทานสำหรับท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร ที่มีห้องผสมแตกต่างกัน พบว่าความดันลดจากแรงเสียดทานที่ได้จากห้องผสมแบบ Cross-junction มีค่าสูงกว่าความดันลดจากแรงเสียดทานที่ได้จากห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet เนื่องมาจากค่า c ของห้องผสมแบบ Cross-junction มีค่ามากกว่าในห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet จึงเป็นเหตุผลว่าทำไม ความดันลดจากแรงเสียดทานที่ได้จากห้องผสมแบบ Cross-junction มีค่าสูงกว่าความดันลดจากแรงเสียดทานที่ได้จากห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ดังแสดงในรูปที่ 5.39 และในรูปที่ 5.39 (ข) สังเกตพบว่าความดันลดมีการลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เป็นผลเนื่องมาจากความดันลดในช่วงนี้เป็นรูปแบบการไหลแบบ churn flow ซึ่ง churn flow เป็นรูปแบบการไหลที่มีความปั่นป่วนไม่คงที่ทำให้เกิดผลการทดลองดังกล่าว



รูปที่ 5.39 ความดันลดจากแรงเสียดทานสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ก) 0.22 มิลลิเมตร และ (ข) 0.53 มิลลิเมตร

5.3.1 Frictional pressure drop บนพื้นฐานของ homogeneous flow model

homogeneous flow model สมมติว่าแก๊สและของเหลวไหลด้วยความเร็วเท่ากัน ส่วนผสมของแก๊ส-ของเหลวถือเป็นการไหลของสถานะเดียวที่มีคุณสมบัติของเหลวเฉลี่ย

สำหรับการคำนวณ frictional pressure drop บนพื้นฐานของ homogeneous flow model ดังสมการที่ (5.14) และ (5.15)

$$-\frac{dP_f}{dz} = \frac{f_{TP} G^2}{2D\rho_H} \quad (5.14)$$

$$\rho_H = \left[\frac{x}{\rho_G} + \frac{(1-x)}{\rho_L} \right]^{-1} \quad (5.15)$$

ในสมการที่ (5.14) และ (5.15), $(-dP_f/dz)$ คือ two-phase frictional pressure gradient, G คือ mass flux, D คือ ขนาดท่อไมโครแชนแนล, x คือ mass quality, ρ_H คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของ homogeneous fluid, ρ_L และ ρ_G คือ ความหนาแน่นของเหลวและแก๊สตามลำดับ, f_{TP} แสดงในสมการที่ (5.14) หมายถึง two-phase Darcy friction factor ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ two-phase Reynolds number

$$\text{Re}_{TP} = \frac{GD}{\mu_{TP}} \quad (5.16)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ($\text{Re}_{TP} \leq 2100$)

$$f_{TP} = \frac{64}{\text{Re}_{TP}} \quad (5.17)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ($\text{Re}_{TP} > 2100$) ในท่อเรียบ

$$f_{TP} = \frac{0.3164}{\text{Re}_{TP}^{0.25}} \quad (5.18)$$

เมื่อ μ_{TP} ในสมการที่ (5.16) คือ ความหนืดสองสถานะ, ซึ่งรูปแบบต่างๆที่ถูกนำเสนอโดยนักวิจัยที่แตกต่างกัน

ข้อมูลการทดลองความดันลดลงพล็อตกับค่าที่ทำนายโดยรูปแบบของนักวิจัยต่างๆ ดังนำเสนอในรูปที่ 5.40 - 5.60 Mean absolute error (MAE) ที่ระบุไว้ในรูปหมายถึงความถูกต้องของการทำนายของรูปแบบที่กำหนด

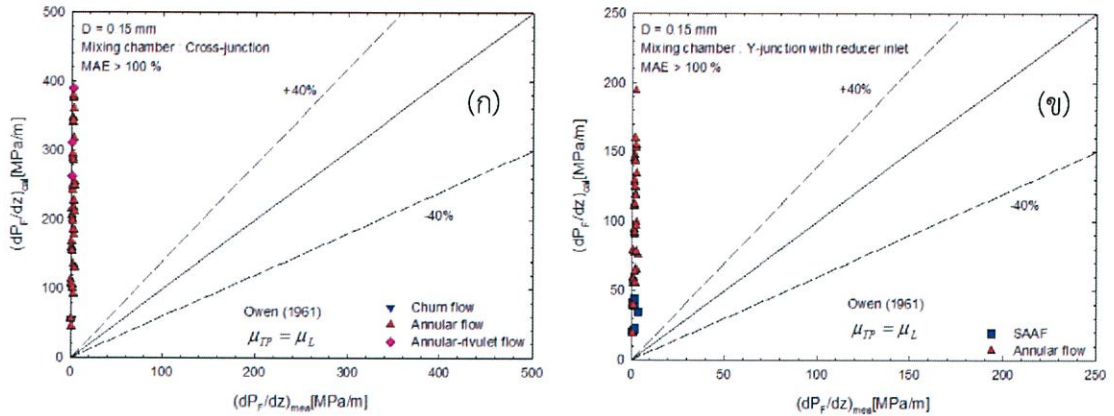
สำหรับการทำนายที่ดีที่สุดที่ได้รับโดยวิธีการที่พัฒนาโดย Dukler และคณะ (1964) ในท่อไมโครแชนแนลที่มีเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร ที่มีห้องผสมแบบ Cross-junction ซึ่งข้อมูลสัดส่วนช่องว่างสอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้นของสมการ (5) คือ homogeneous flow model

สำหรับท่อไมโครแชนแนลที่มีเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร ที่มีห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet และ ท่อไมโครแชนแนลที่มีเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 และ 0.15 มิลลิเมตร ทั้งสองห้องผสม พบว่าไม่สามารถทำนายได้โดย homogeneous flow model ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลสัดส่วนช่องว่างที่มีการเบี่ยงเบนจาก homogeneous flow model

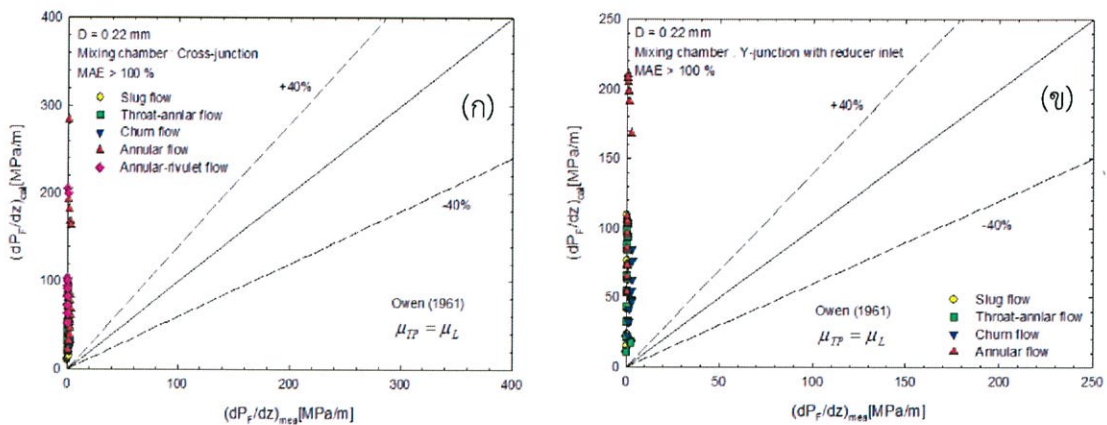
จากการเปรียบเทียบพบว่าการทำนายโดย homogeneous flow model ไม่เหมาะสมสำหรับท่อที่มีขนาดเล็ก

ความหนืดสองสถานะได้รับการสมมุติโดย Owen (1961) ดังแสดงในสมการ (5.19)

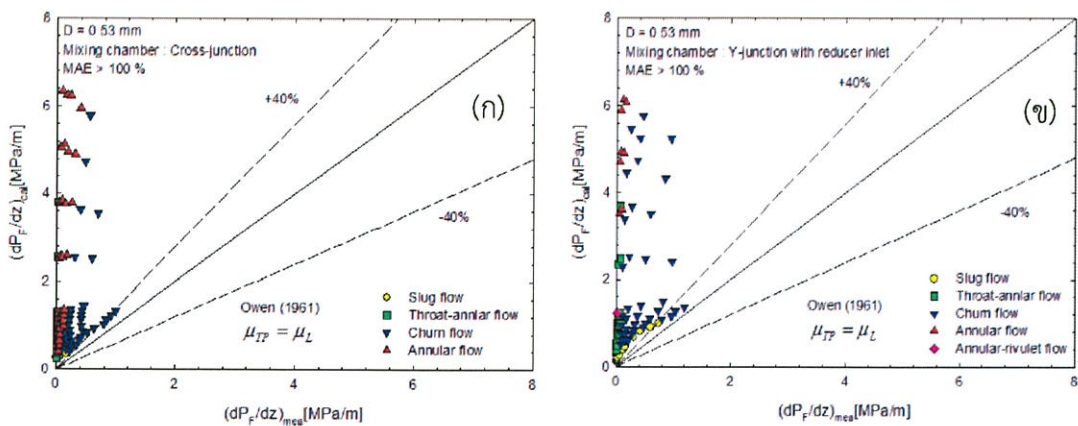
$$\mu_{TP} = \mu_L \tag{5.19}$$



รูปที่ 5.40 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร โดย Owen (1961) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



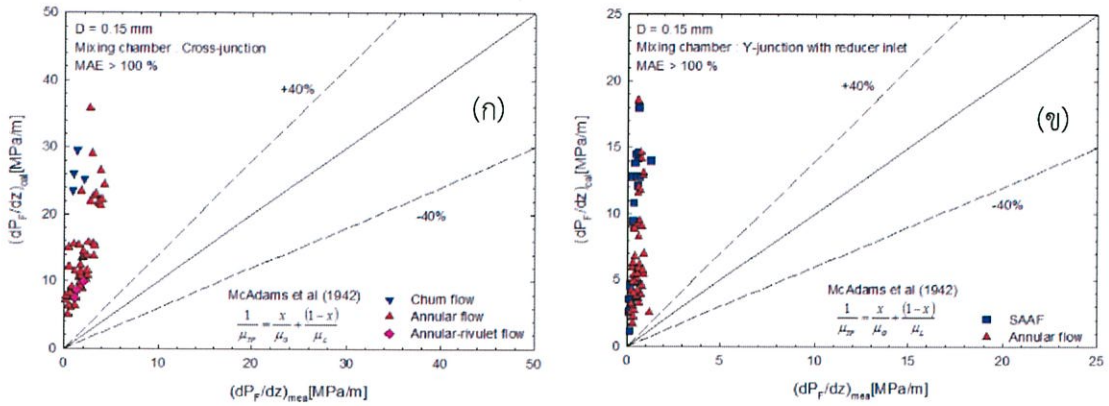
รูปที่ 5.41 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร โดย Owen (1961) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



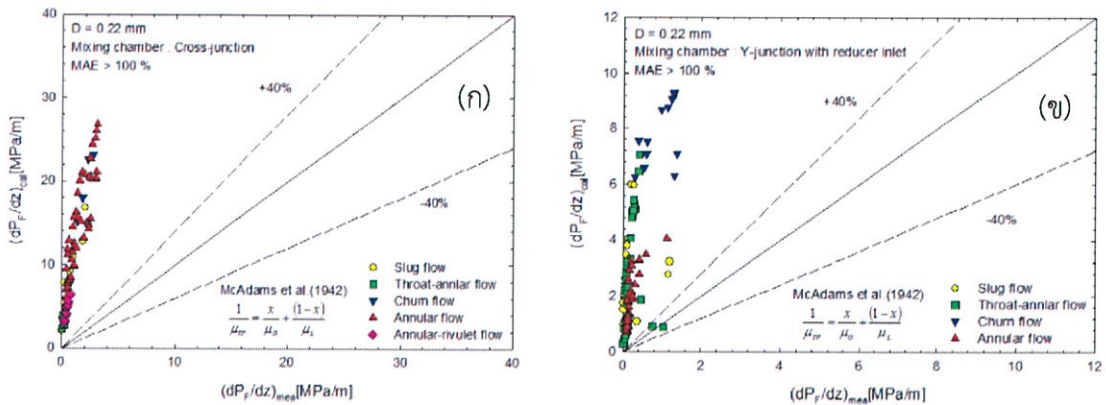
รูปที่ 5.42 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร โดย Owen (1961) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

McAdams และคณะ (1942) เสนอความหนืดสองสถานะในสมการที่ (5.20)

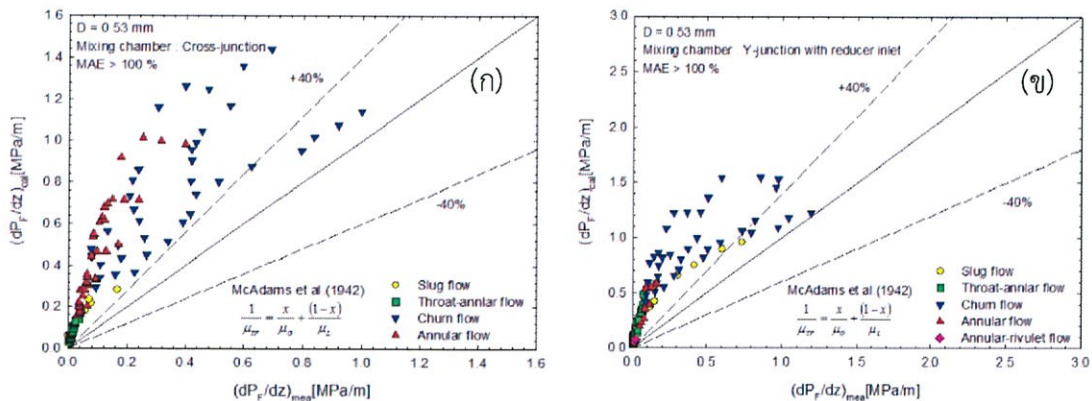
$$\frac{1}{\mu_{TP}} = \frac{x}{\mu_G} + \frac{(1-x)}{\mu_L} \quad (5.20)$$



รูปที่ 5.43 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร โดย McAdams (1942) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



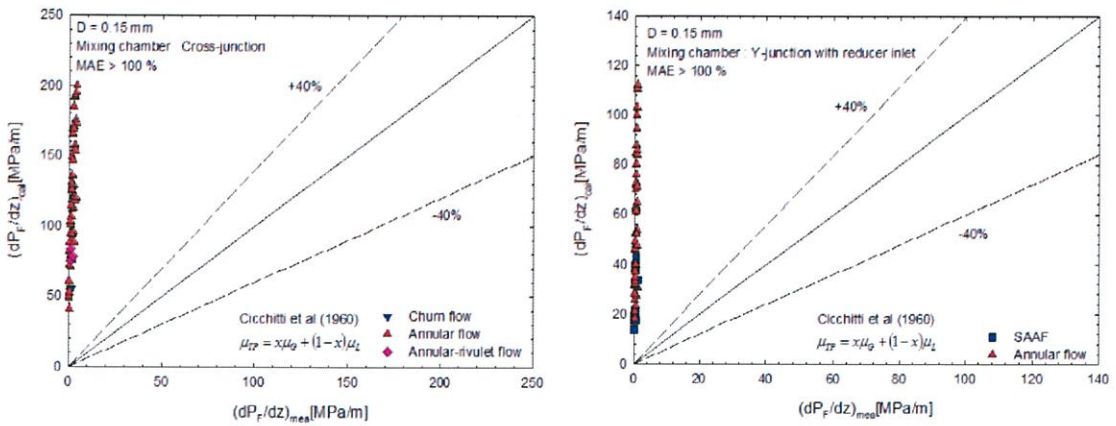
รูปที่ 5.44 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร โดย McAdams (1942) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



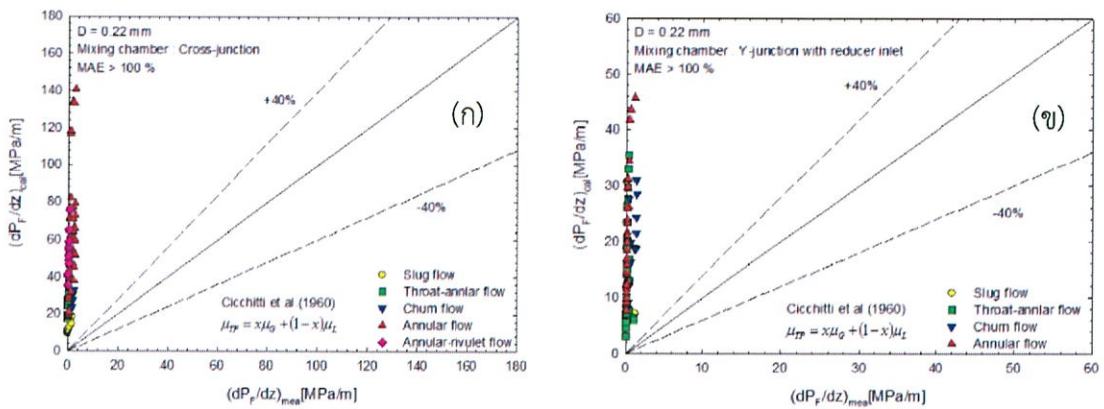
รูปที่ 5.45 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร โดย McAdams (1942) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

Cicchitti และคณะ (1960) เสนอความหนืดสองสถานะในสมการที่ (5.21)

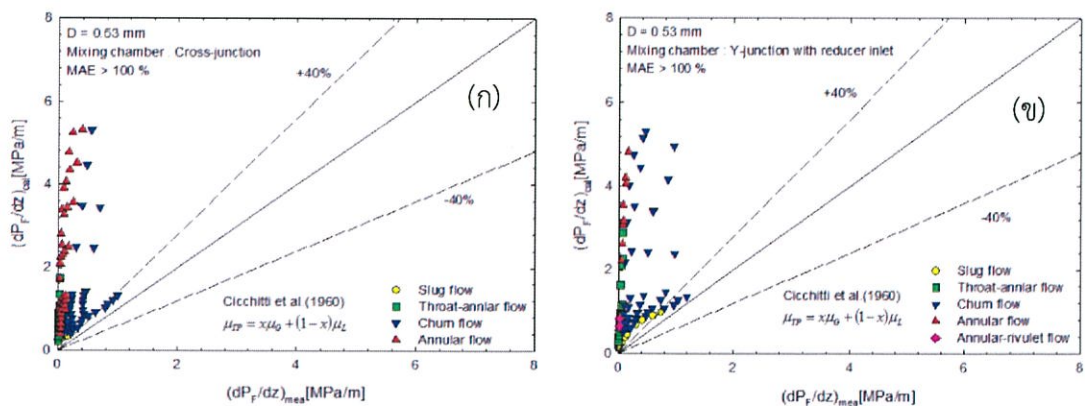
$$\mu_{TP} = x\mu_G + (1-x)\mu_L \quad (5.21)$$



รูปที่ 5.46 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร โดย Cicchitti และ คณะ (1960) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



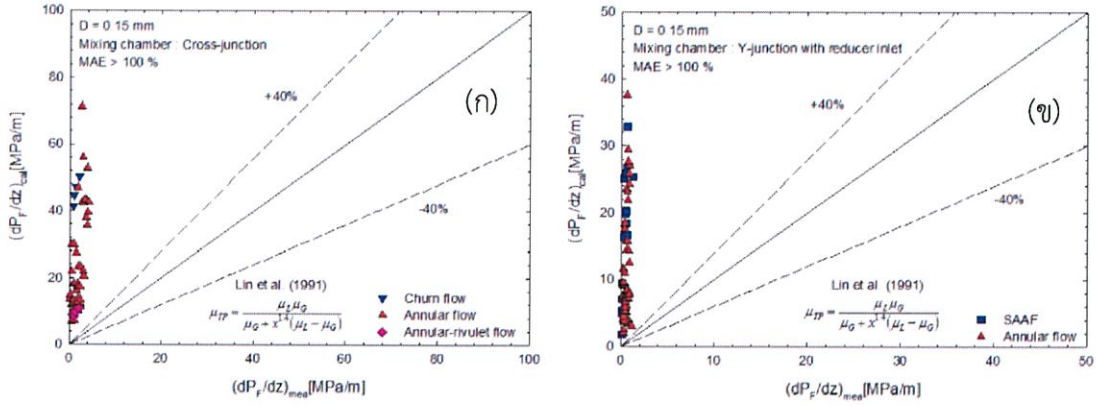
รูปที่ 5.47 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร โดย Cicchitti และ คณะ (1960) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



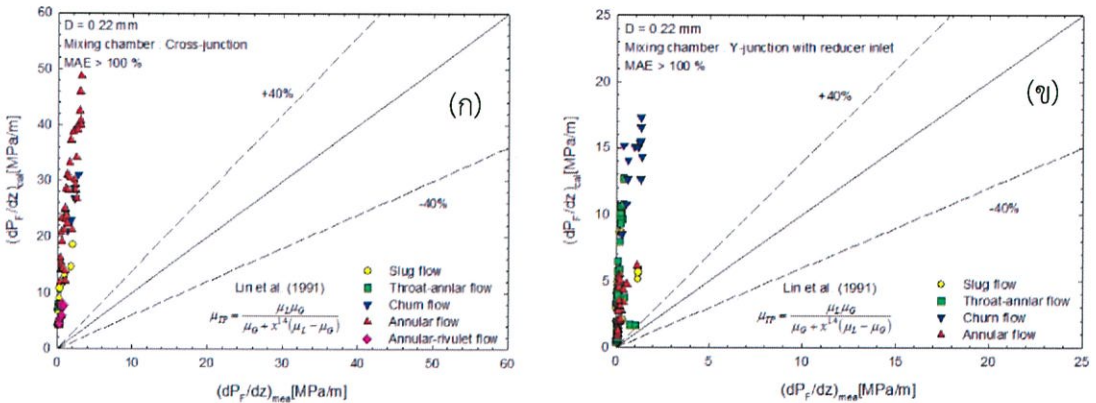
รูปที่ 5.48 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร โดย Cicchitti และ คณะ (1960) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

Lin และคณะ (1991) เสนอความหนืดสองสถานะในสมการที่ (5.22)

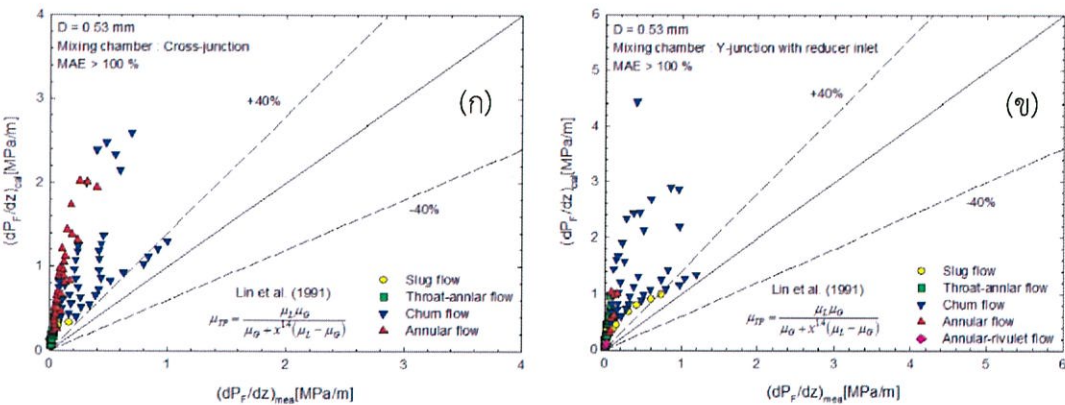
$$\mu_{TP} = \frac{\mu_L \mu_G}{\mu_G + x^{1.4}(\mu_L - \mu_G)} \quad (5.22)$$



รูปที่ 5.49 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครแชนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร โดย Lin และ คณะ (1991) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



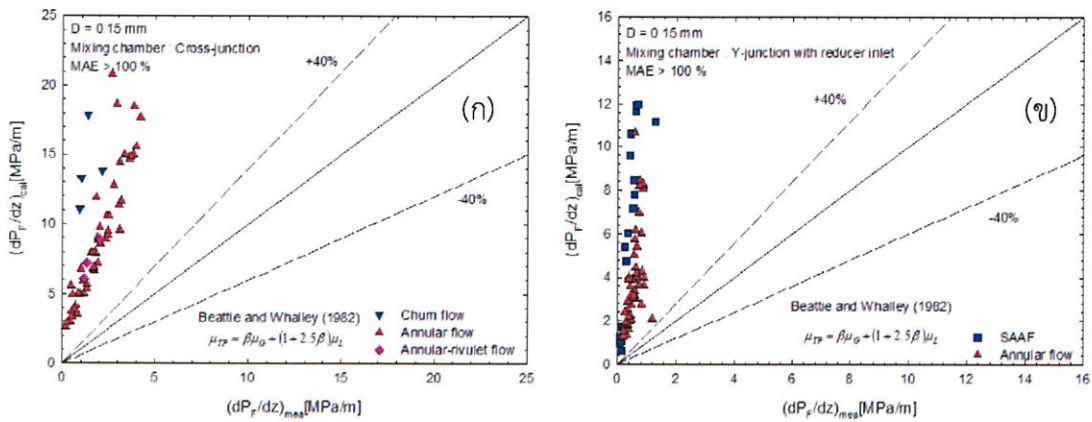
รูปที่ 5.50 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครแชนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร โดย Lin และ คณะ (1991) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



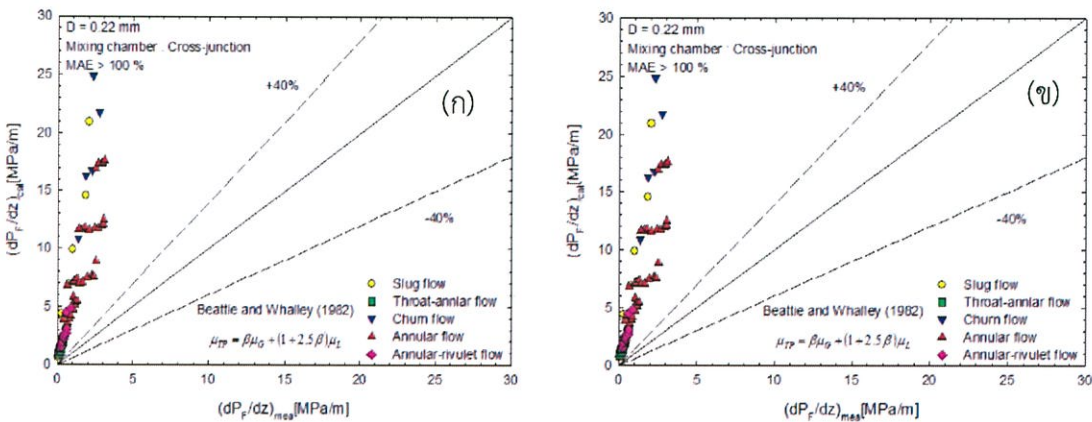
รูปที่ 5.51 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครแชนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร โดย Lin และ คณะ (1991) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

Beattie และ Whalley (1982) เสนอความหนืดสองสถานะในสมการที่ (5.23)

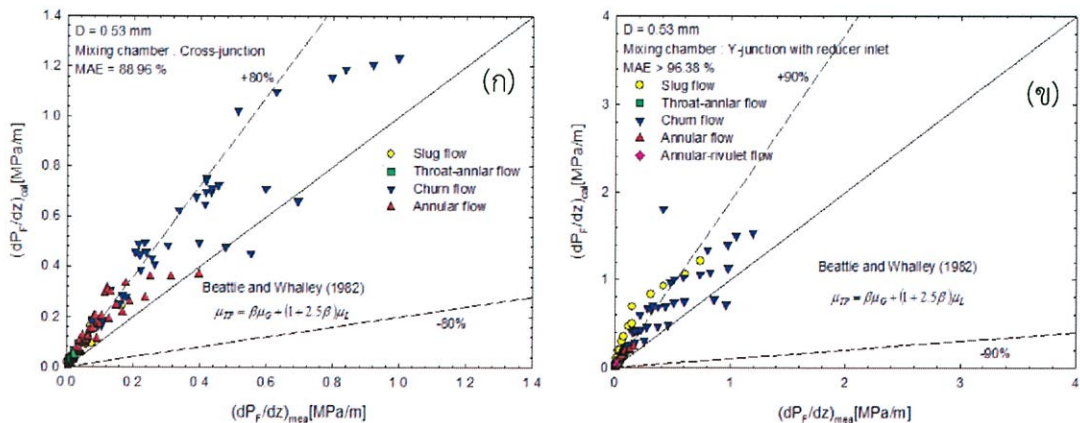
$$\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1 + 2.5\beta)\mu_L \tag{5.23}$$



รูปที่ 5.52 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร โดย Beattie และ Whalley (1982) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



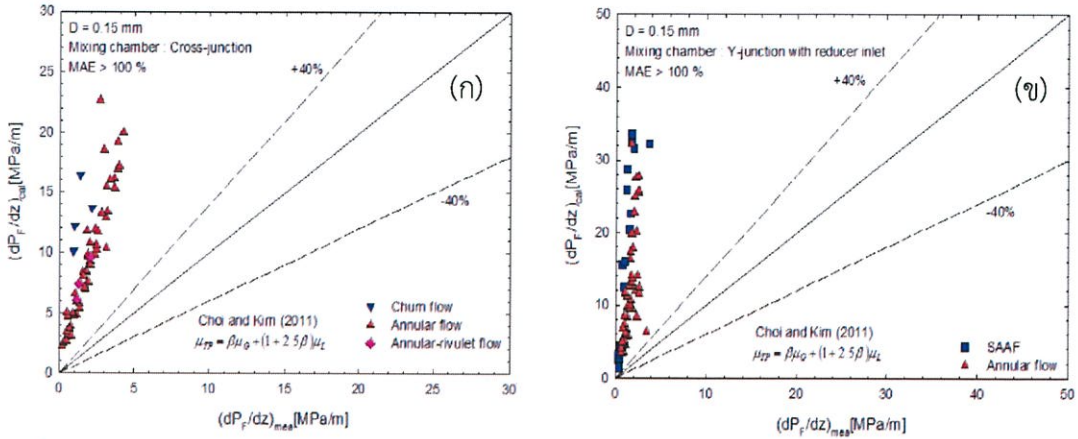
รูปที่ 5.53 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร โดย Beattie และ Whalley (1982) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



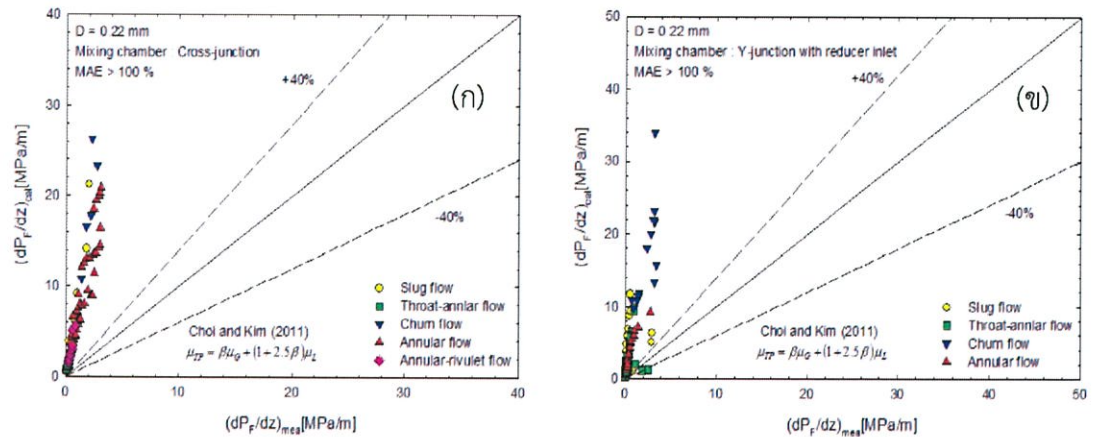
รูปที่ 5.54 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร โดย Beattie และ Whalley (1982) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

Choi และ Kim (2011) เสนอความหนืดสองสถานะในสมการที่ (5.24)

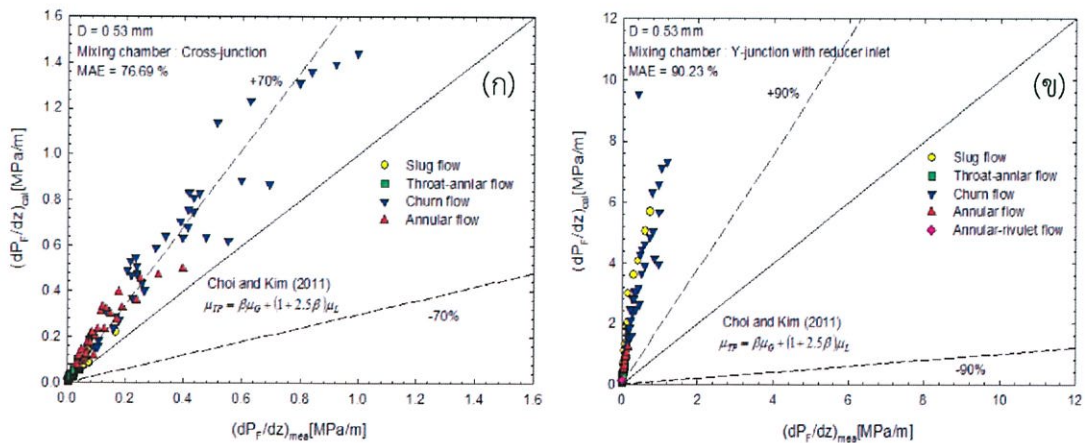
$$\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1 + 2.5\beta)\mu_L \quad (5.24)$$



รูปที่ 5.55 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim (2011) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



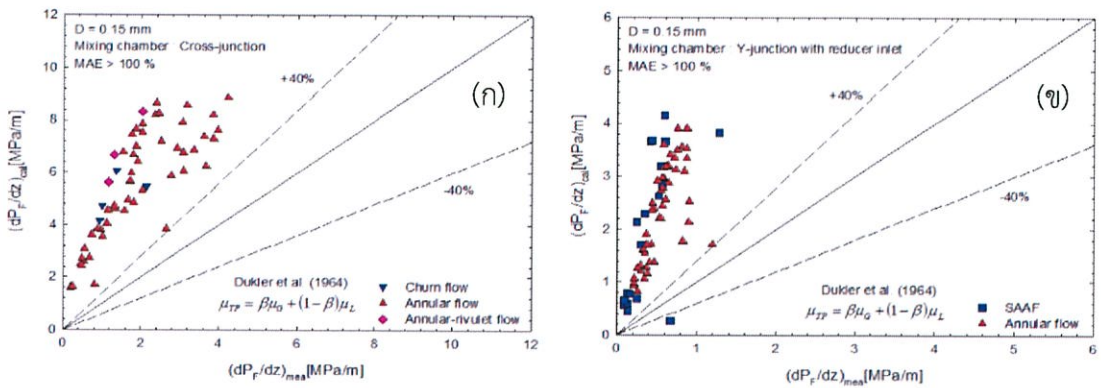
รูปที่ 5.56 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim (2011) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



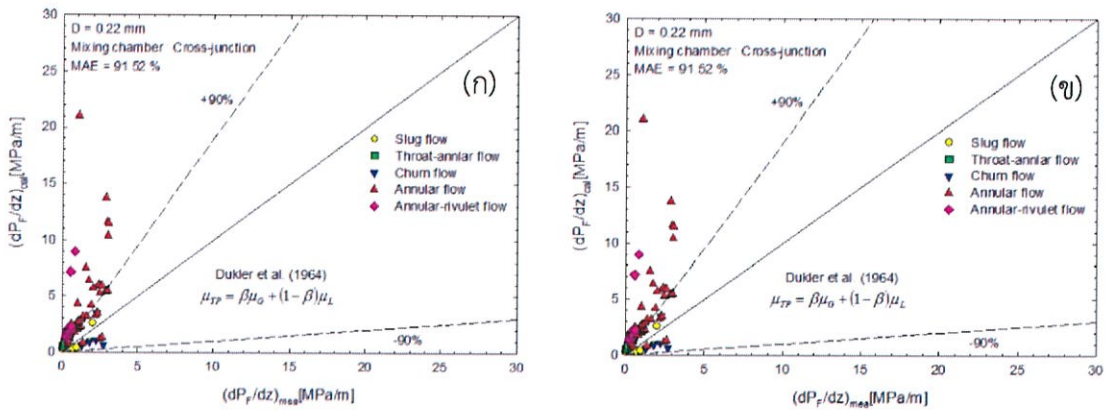
รูปที่ 5.57 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim (2011) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

Dukler และคณะ (1964) เสนอความหนืดสองสถานะในสมการที่ (5.25)

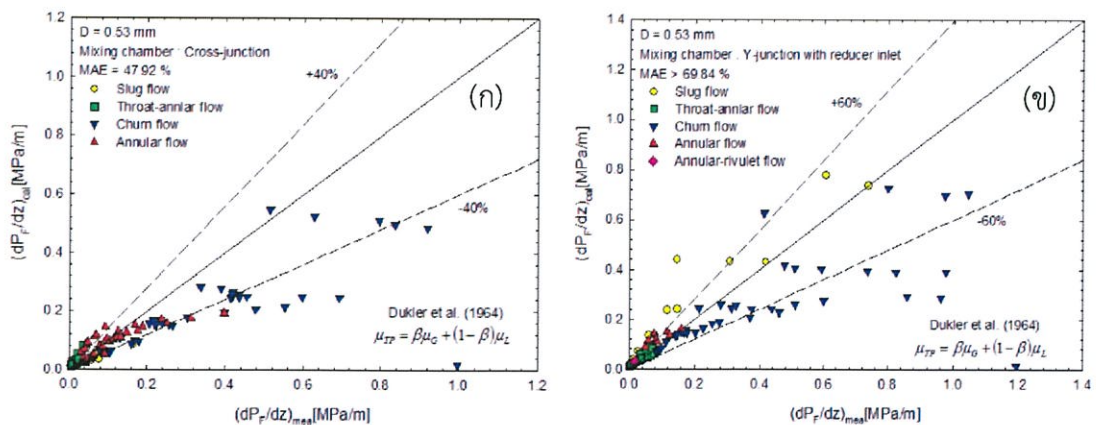
$$\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1-\beta)\mu_L \tag{5.25}$$



รูปที่ 5.58 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.15$ มิลลิเมตร โดย Dukler และ คณะ (1964) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.59 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.22$ มิลลิเมตร โดย Dukler และ คณะ (1964) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.60 ข้อมูลการทดลองกับการทำนายสำหรับท่อไมโครเซนแนล $\phi = 0.53$ มิลลิเมตร โดย Dukler (1964) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

5.3.2 Two-phase frictional multiplier

ความดันจากความเสียดทานของการไหลสองสถานะแก๊ส-ของเหลวมีความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์, χ และ two-phase frictional multiplier, ϕ_L^2 (Lockhart Martinelli, (1949)) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5.26)

$$\phi_L^2 = \frac{(dP_F/dz)_{TP}}{(dP_F/dz)_L} \quad (5.26)$$

เมื่อ $(dP_F/dz)_L$ คือ ความดันลดจากแรงเสียดทานต่อหน่วยความยาวของของเหลว และ $(dP_F/dz)_{TP}$ คือ ความดันลดจากแรงเสียดทานต่อหน่วยความยาวสองสถานะ Martinelli parameter, χ^2 หาได้จากสมการที่ (5.27)

$$\chi^2 = \frac{(dP_F/dz)_L}{(dP_F/dz)_G} \quad (5.27)$$

สำหรับท่อกลมเรียบสามารถนำเสนอในรูปแบบ Lockhart–Martinelli correlation ดังนี้

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{c}{\chi} + \frac{1}{\chi^2} \quad (5.28)$$

เมื่อ ϕ_L^2 คือ two-phase frictional multiplier, χ คือ แสดงพารามิเตอร์ Lockhart-Martinelli, c คือ ค่าคงที่ 5-20 ขึ้นอยู่กับการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน ค่าพารามิเตอร์นี้เสนอโดย Chisholm (1967) เช่น $c = 20$ เมื่อการไหลของแก๊สและของเหลวอยู่ในภูมิภาคการไหลแบบปั่นป่วน และ $c = 5$ ถ้าการไหลสองสถานะอยู่ในภูมิภาคการไหลแบบราบเรียบซึ่งสอดคล้องกับงานปัจจุบัน

Mishima และ Hibiki (1996) ได้เสนอความสัมพันธ์ค่าของ c เป็นฟังก์ชันของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_L^2 และ χ ได้รับจาก

$$c = 21(1 - e^{-319D_h}) \quad (5.29)$$

เมื่อ D_h ย่อมาจาก hydraulic diameter

เมื่อเร็ว ๆ นี้ English and Kandlikar (2006) ที่นำเสนอความสัมพันธ์ที่มีการแก้ไขบนพื้นฐาน Mishima and Hibiki's correlation (1996) ดังแสดงในสมการที่ (5.30)

$$c = c(1 - e^{-319D_h}) \quad (5.30)$$

ค่า c ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไหลของแก๊สและของเหลว สำหรับข้อมูลงานในปัจจุบันการไหลสองสถานะอยู่ในภูมิภาคการไหลแบบราบเรียบ และด้วยเหตุนี้ $c = 5$ เหมาะสำหรับการใช้ในการคำนวณ

Kawahara และคณะ (2009) เสนอความสัมพันธ์ค่าของ c เป็นฟังก์ชันของห้องผสม

$$c = bBo^{0.04} Re_L^{0.25} We_G^{-0.12} \tag{5.31}$$

เมื่อ $b = 1.38$ (Mixing chamber : Cross-junction), $b = 0.55$ (Mixing chamber : Y-junction with reducer inlet)

Choi และ Kim (2011) เสนอความสัมพันธ์ค่าของ c เป็นฟังก์ชันของรูปแบบการไหล

Bubble regime : $c = c_M(0.0012G+1.473)$ (5.32)

Transition regime : $c = c_M(0.0008G+0.95)$ (5.33)

Liquid ring regime : $c = c_M(aG+b)$ (5.34)

($a = 0.658AR+0.13$, $b = 0.0016AR+0.0003$)

Venkatesan และคณะ (2011) เสนอความสัมพันธ์ค่าของ c เป็นฟังก์ชันของรูปแบบการไหลและ Bone number, Bo

จะใช้สำหรับทำนาย slug annular flow

$$c = 4(We_L)^{0.3} (Re_G/Re_L)^{0.5} \quad \text{สำหรับ } Bo > 1 \tag{5.35}$$

$$c = 2(We_L)^{0.5} (Re_G/Re_L)^{0.5} \quad \text{สำหรับ } Bo < 1 \tag{5.36}$$

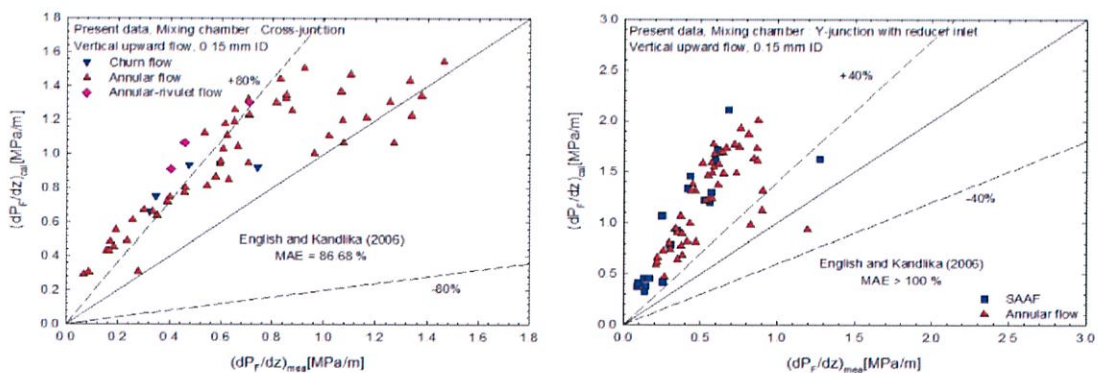
สำหรับรูปแบบการไหลอื่นๆ ให้ใช้ค่า c ของ Chisholm (1967)

สำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 ให้ $c = 1$ สำหรับทุกรูปแบบการไหลยกเว้น slug annular flow

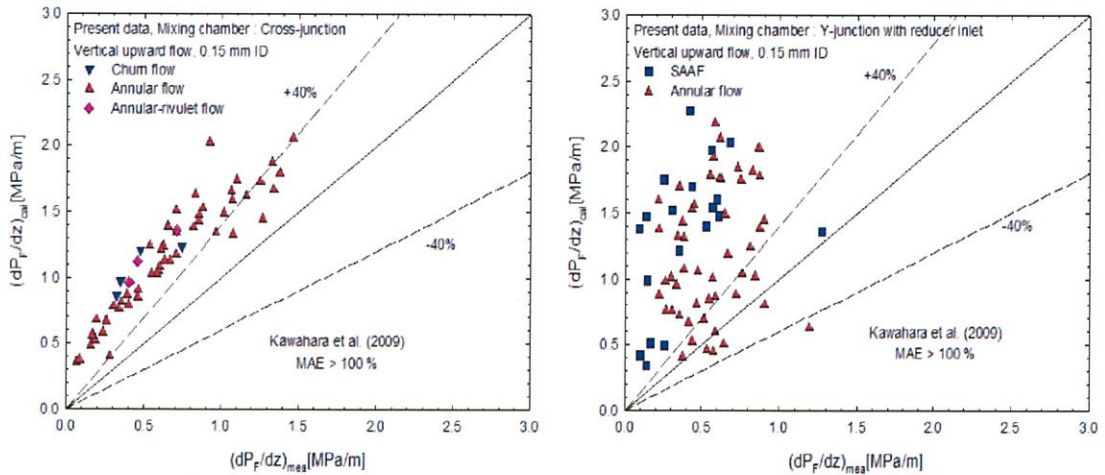
กราฟจากการทดลองต่อไปนี้ทางด้านซ้ายเป็นกราฟที่ได้จากห้องผสมแบบ Cross-junction ทางด้านขวามือเป็นกราฟที่ได้จากห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet

ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร สำหรับห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ไม่สามารถทำนายได้ทั้ง 4 correlation ดังแสดงในรูปที่ 5.61-5.64

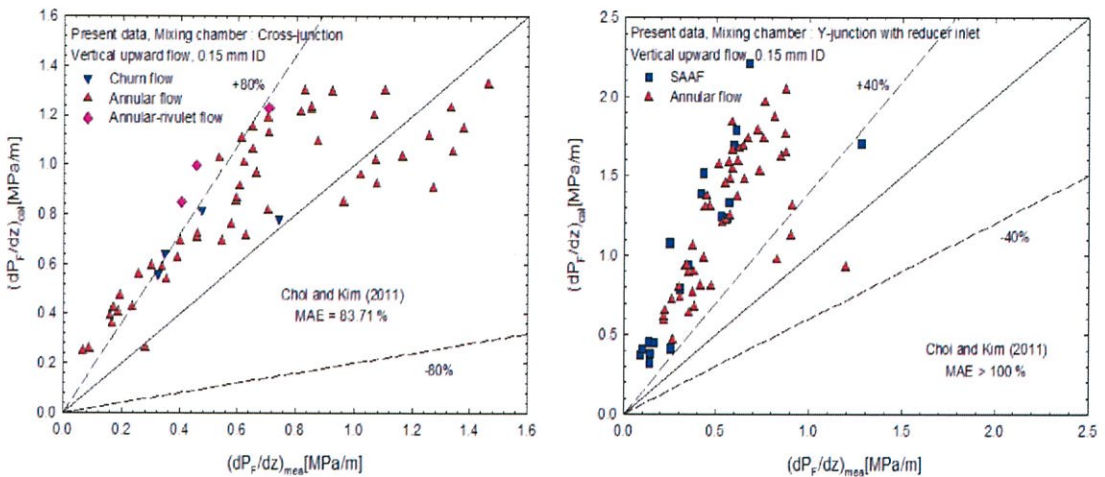
สำหรับห้องผสมแบบ Cross-junction พบว่า Venkatesan และ คณะ (2011) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ annular-rivulet flow ดังแสดงในรูปที่ 5.64



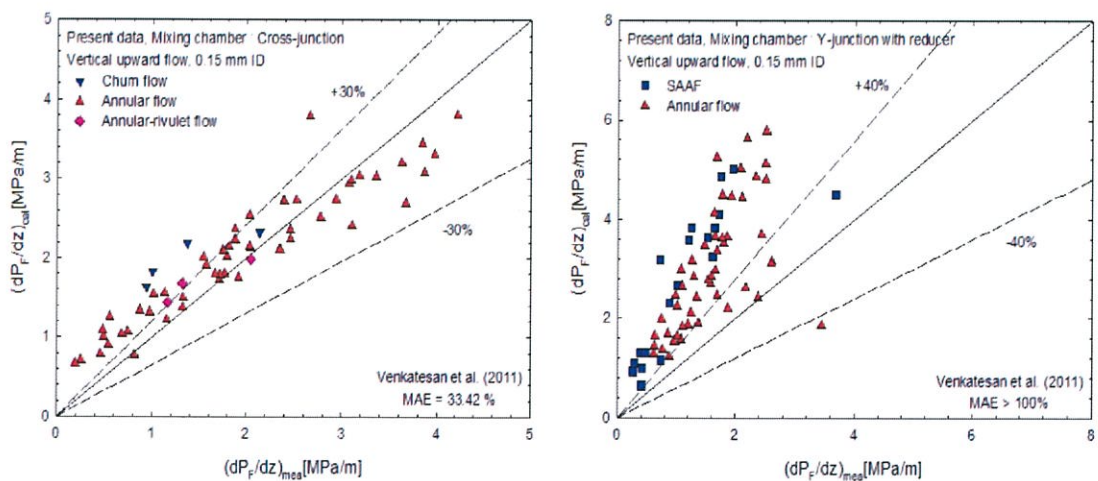
รูปที่ 5.61 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร โดย English และ Kandlika (2006)



รูปที่ 5.62 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร โดย Kawahara และ คณะ (2009)

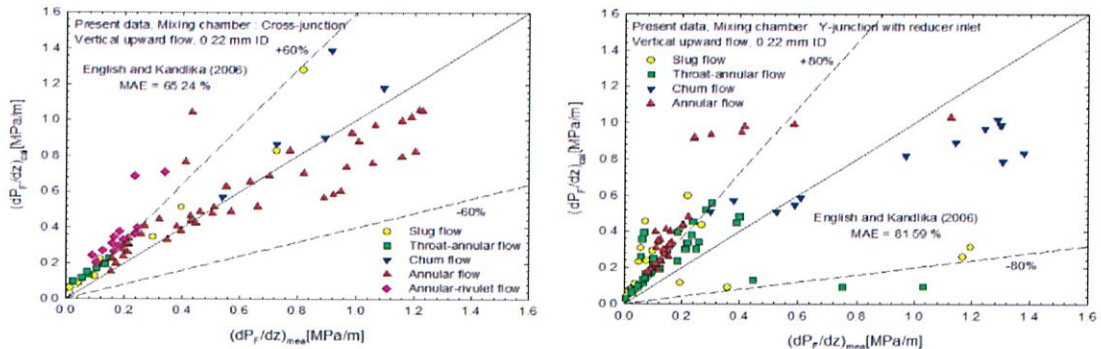


รูปที่ 5.63 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim (2011)

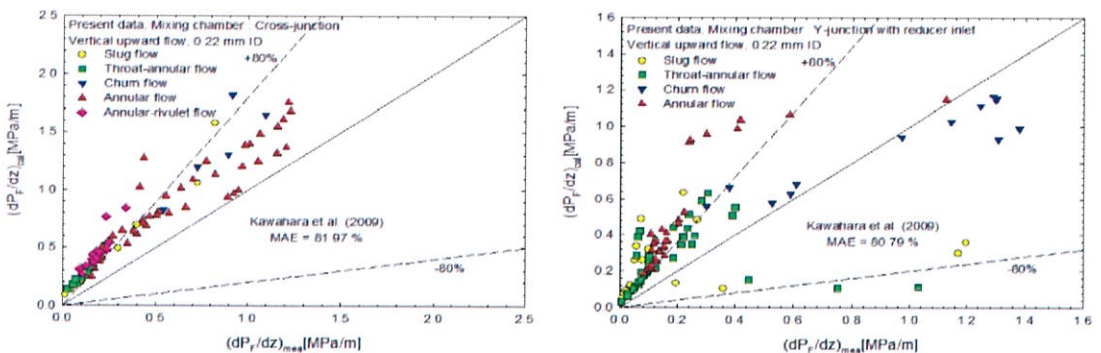


รูปที่ 5.64 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร โดย Venkatesan และ คณะ (2011)

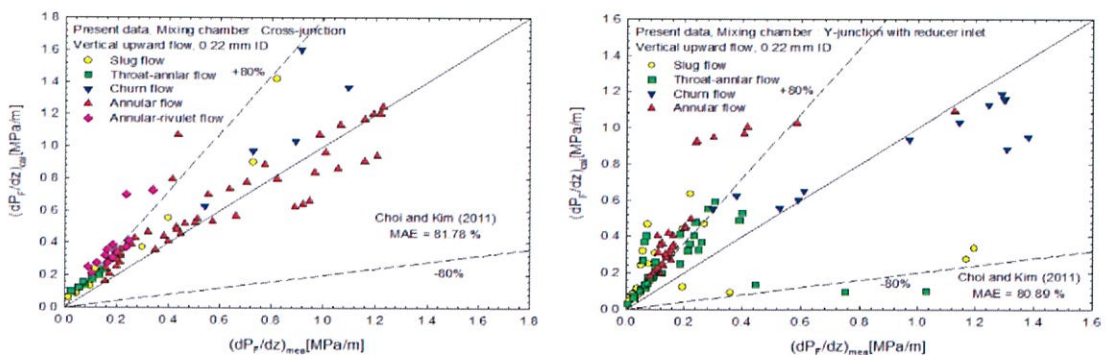
- ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร สำหรับห้องผสมแบบ Cross-junction
- English และ Kandlikar (2006) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ churn flow และ annular flow ดังแสดงในรูปที่ 5.65
 - Choi และ Kim (2011) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ churn flow ดังแสดงในรูปที่ 5.67
 - Venkatesan และ คณะ (2011) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ throat-annular flow, churn flow และ annular flow ดังแสดงในรูปที่ 5.68
- สำหรับห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ทั้ง 4 correlation สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ churn flow ดังแสดงในรูปที่ 5.65-5.68



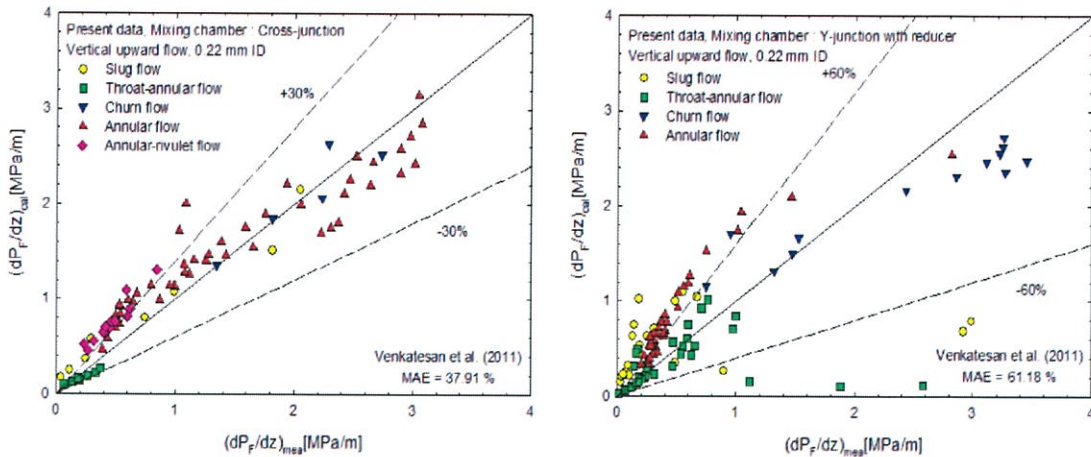
รูปที่ 5.65 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 มิลลิเมตร โดย English และ Kandlika (2006)



รูปที่ 5.66 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 มิลลิเมตร โดย Kawahara และ คณะ (2009)



รูปที่ 5.67 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim (2011)



รูปที่ 5.68 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 มิลลิเมตร โดย Venkatesan และ คณะ (2011)

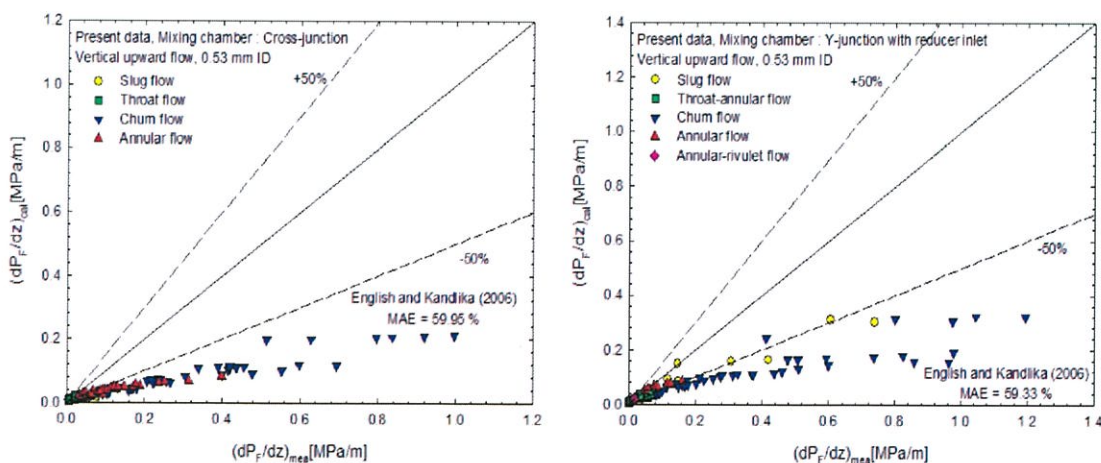
ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร สำหรับห้องผสมแบบ Cross-junction

- English และ Kandlikar (2006), Kawahara และ คณะ (2009) และ Choi และ Kim (2011) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ throat-annular flow ดังแสดงในรูปที่ 5.69-5.71
- Venkatesan และ คณะ (2011) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ throat-annular flow และ annular flow ดังแสดงในรูปที่ 5.72

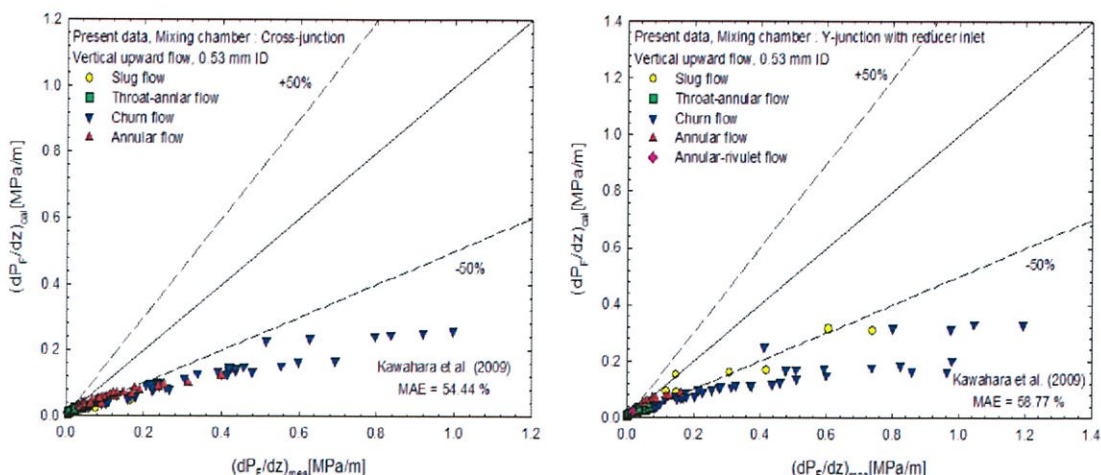
สำหรับห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet

- English และ Kandlikar (2006) และ Kawahara และ คณะ (2009) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ annular flow และ annular-rivulet flow ดังแสดงในรูปที่ 5.69-5.70
- Choi และ Kim (2011) สามารถทำนายได้ในรูปแบบการไหลแบบ annular-rivulet flow ดังแสดงในรูปที่ 5.71

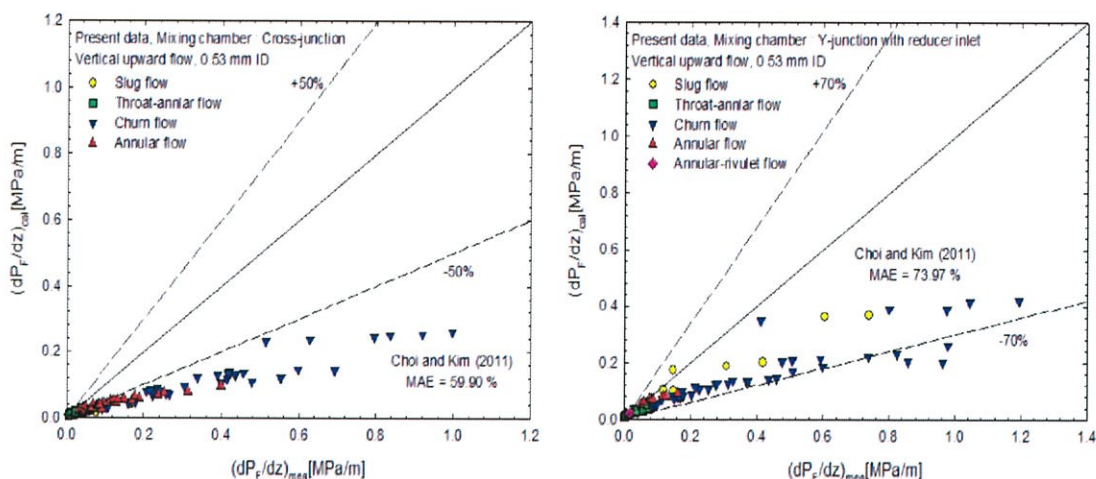
จากการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายโดยนักวิจัยท่านต่างๆพบว่า ของ Venkatesan และ คณะ (2011) ทำนายได้ดีที่สุด ซึ่งในห้องผสมแบบ Cross-junction จะทำนายได้ดีกว่าในห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของห้องผสมที่มีความแตกต่างกัน



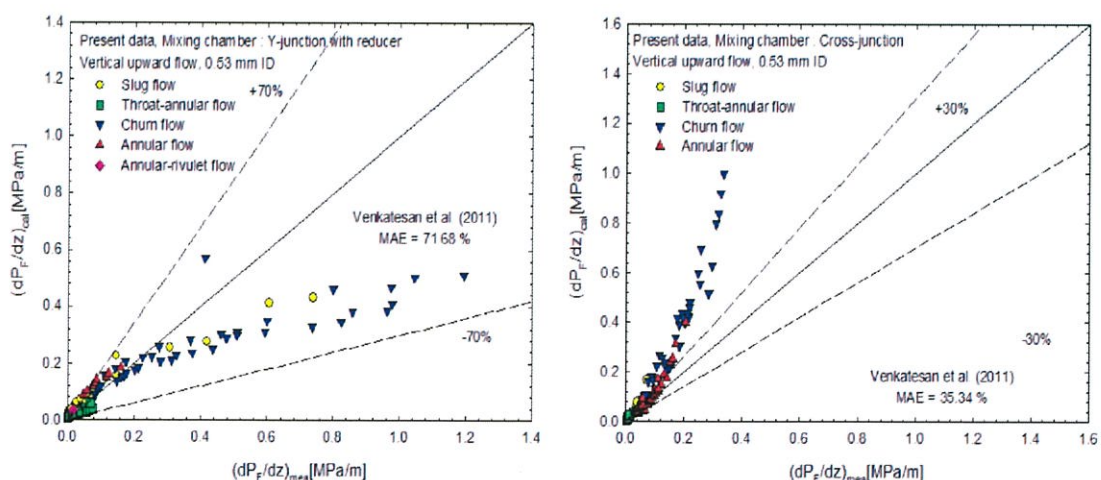
รูปที่ 5.69 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร โดย English และ Kandlika (2006)



รูปที่ 5.70 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร โดย Kawahara และ คณะ (2009)



รูปที่ 5.71 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร โดย Choi และ Kim (2011)



รูปที่ 5.72 ข้อมูลการทดลองพล็อตกับการทำนายสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร โดย Venkatesan และ คณะ (2011)

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของรูปแบบการไหลของการไหลสองสถานะ, สัดส่วนช่องว่าง และ ความดันลด ของท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร ทั้ง 2 ห้องผสมพบว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจน

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. รูปแบบการไหลที่ได้รับ ได้แก่ annular flow, annular-rivulet flow, churn flow, slug/annular alternating flow, slug flow และ throat-annular flow

2. จากการเปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลของทั้งสองห้องผสมของทั้ง 3 ขนาดของท่อไมโครแชนแนล พบว่ามีแตกต่างกันอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากมีห้องผสมเป็นคนละชนิดกัน คือ ห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าส่วนทดสอบ ซึ่ง ในห้องผสมแบบ Cross-junction จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับส่วนทดสอบ จึงทำให้รูปแบบการไหลที่ได้รับมีความเสถียรมากกว่า ดังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร

3. ผลของรูปทรงห้องผสมที่มีต่อสัดส่วนช่องว่างจะมีผลน้อยลงเมื่อลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

4. จากการเปรียบเทียบความดันลดทั้ง 3 ท่อ ของทั้งสองห้องผสมพบว่าท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาดเล็ก ส่งผลให้ความดันลดมีค่ามากขึ้น เป็นผลมาจาก major Loss

5. ความดันลดที่ได้จากห้องผสมแบบ Cross-junction มีค่าสูงกว่าความดันลดที่ได้จากห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet

6. Separated flow model สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า Homogenous flow

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

1. ควรออกแบบส่วนการทดสอบให้สามารถศึกษาารูปแบบการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนไปด้วยกัน

2. ควรใช้ของไหลในอุณหภูมิที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อรูปแบบการไหล

บรรณานุกรม

- Akbar M.K., Plummer D.A., Ghiaasiaan S.M., 2003. On gas-liquid two-phase flow regimes in microchannels, *Int. of Multiphase Flow* 29 855-865.
- Arcanjo, A.A., Tibirica, C.B., and Ribatski, G., 2010. Evaluation of flow patterns and elongated bubble characteristics during the flow boiling of halocarbon refrigerants in a micro-scale channel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 766-775.
- Baker O., 1954. Design of pipe lines for simultaneous flow of oil and gas, *Oil Gas J.* 26.
- Beattie D.R.H., Whalley P.B., 1982. A simple two-phase flow frictional pressure drop calculation method, *Int. J. Multiphase Flow* 8 83-87.
- Chisholm D., 1967. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow, *Int. J. Heat Mass Transfer* 10 1767-1778.
- Chisholm D., 1983. *Two-phase Flow in Pipeline and Heat Exchangers*, Pitman Press Ltd., Bath, England.
- Choi Chiwoong, Kim Moohwan, 2011. Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 32 1199-1207.
- Cicchitti A., Lombardi C., Silvestri M., Soldadaini G., Zavalluilli R., 1990. Two-phase cooling experiments — pressure drop, heat transfer and burnout measurement, *Energy Nucl.* 7 407-425.
- Dukler A.E., Wicks III M., Cleveland R.G., 1964. Pressure drop and hold-up in two-phase flow, *AIChE J.* 10 38-51.
- English N.J., Kandlikar S.G., 2006. An experimental investigation into the effect of surfactants on air-water two-phase flow in minichannels, *Heat Transfer Eng.* 27 99-109.
- Garimella S., Killion J.D., Coleman J.W., 2002. An experimentally validated model for two-phase pressure drop in the intermittent flow regime for circular microchannels, *J. Fluid Eng.* 124 205-214.
- Harirchian, T., and Garimella, S.V., 2010. A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 2694-2702.
- Kandlikar. S.G., 2002. Fundamental issues related to flow boiling in mini-channels and micro-channel, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 26 389-407.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Kawahara A., Chung P.M.-Y., Kawaji M., 2002. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *Int. J. Multiphase Flow* 28 1411–1435.
- Kawahara Akimaro, Sadatomi Michio, Nei Keitaro, Matsuo Hideki, 2009. Experimental study on bubble velocity, void fraction and pressure drop for gas–liquid two-phase flow in a circular microchannel, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30 831–841.
- Kawaji M., Mori K., Bolintineanu D., 2009. The Effects of Inlet Geometry and Gas-Liquid Mixing on Two-Phase Flow in Microchannels, *ASME J. Fluids Eng.*, 131(4), 041302(1-7)
- Lin S., Kwok C.C.K., Li R.Y., Chen Z.H., Chen Z.Y., (1991). Local frictional pressure drop during vaporization for R-22 through capillary tubes, *Int. J. Multiphase Flow* 17 95–102.
- Lockhart R.W., Martinelli R.C., 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.* 45 39–48.
- Mc Adams W.H., Woods W.K., Heroman L.C., (1942). Vaporization inside horizontal tubes-III, Benzene-Oil Mixtures. *Trans. ASME.* 64 193.
- Mehendale S.S., Jacobi A.M., Ahah R.K., Fluid flow and heat transfer at micro and meso-scales with application to heat exchanger design, *Appl. Mech. Rev.* 53 (2000) 175–193.
- Mishima K., Hibiki T., 1996. Some characteristics of air–water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *Int. J. Multiphase Flow* 22 703–712.
- Owen W.L., (1961). Two-phase pressure gradient, *Int. Dev. Heat Transfer, Pt II*, ASME, New York.
- Saisorn S., Wongwises S., 2008. Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in a horizontal circular micro-channel, *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 748-760.
- Saisorn S., Wongwises S., 2009. An experimental investigation of two-phase air–water flow through a horizontal circular micro-channel, *Experimental Thermal and Fluid Science* 33 306-315.
- Saisorn S., Wongwises S., 2010. The effects of channel diameter on flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in circular micro-channels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 454-462.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Saisorn S., Wongwises S., 2011. Two-phase air–water flow in micro-channels: An investigation of the viscosity models for pressure drop prediction, *Experimental Thermal and Fluid Science* 38 212-217.
- Serizawa A., Feng Z., Kawara Z., 2002. Two-phase flow in micro-channels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 26 703–714.
- Sur A., Liu D., 2012. Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels, *International Journal of Thermal Sciences* 53 18-34.
- Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., Sadowski D.L., 1999a. Gas-liquid two-phase flow in micro channels Part I: two-phase flow patterns, *Int. J. Multiphase Flow* 25 377-394.
- Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I., LeMouel A., McCord B.N., 1999b. Gas-liquid two-phase flow in micro channels Part II: void fraction and pressure drop, *Int. J. Multiphase flow* 25 395-410.
- Ullmann A., Brauner N., 2007. The prediction of flow pattern maps in mini channels. *Multiphase Sci. Technol.* 19 (1), 49–73.
- Venkatesan M., Das Sarit K., Balakrishnan A.R., 2011. Effect of diameter on two-phase pressure drop in narrow tubes, *Experimental Thermal and Fluid Science* 35 531–541.
- Waelchli S., Rudolf von Rohr P., 2006. Two-phase flow characteristics in gas–liquid microreactors, *Int. J. Multiphase Flow* 32 791–806.
- Xing D., Yan C., Mab X., Sun L., 2014. Effects of void fraction correlations on pressure gradient separation of air-water two-phase flow in vertical mini rectangular ducts, *Progress in Nuclear Energy* 70 84-90.
- Zeguai S., Chikh S., Tadriss L., 2013. Experimental study of two-phase flow pattern evolution in a horizontal circular tube of small diameter in laminar flow conditions, *International Journal of Multiphase Flow* 55 99–110.
- Zhang W., Hibiki T., Mishima K., 2010. Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 453–465.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์

1. การหาค่าความเร็วของน้ำ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$j_L = \frac{\dot{Q}_L}{A} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ \dot{Q}_L คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m} = \rho VA = \rho \dot{Q}_L \quad (\text{ก.2})$$

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการที่ (ก.2) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ

$$\dot{Q}_L = \frac{2.3333E - 07 \text{ kg} / \text{s}}{998 \text{ kg} / \text{m}^3} = 2.3380E - 10 \text{ m}^3 / \text{s}$$

นำ \dot{Q}_L แทนในสมการที่ (ก.1) จะได้

$$j_L = \frac{2.3380e - 10 \text{ m}^3 / \text{s}}{\frac{\pi}{4} (0.00015 \text{ m})^2} = 0.0132 \text{ m}$$

2. การหาค่าความเร็วของอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$j_G = \frac{\dot{Q}_G}{A} \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ \dot{Q}_G คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_G = \dot{Q}_{\text{view}} = \frac{P_{\text{atm}} \dot{Q}_{\text{STP}}}{\left[P_{\text{in}} - (P_{\text{in}} - P_{\text{atm}}) \frac{L_{\text{view}}}{L} \right]} \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ

$P_{\text{in}}, P_{\text{atm}}$ คือ ความดันที่เข้าและออกจากส่วนการทดลอง

L_{view} คือ ระยะทางจากทางเข้าท่อถึงจุดถ่ายรูปรูป

L คือ ความยาวท่อทั้งหมด

\dot{Q}_{STP} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ปรับเทียบค่าแล้ว

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการที่ (ก.4) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ

$$\dot{Q}_G = \frac{(101325 \text{ Pa})(9.8601 \text{ E} - 08 \text{ m}^3 / \text{s})}{\left[143075 \text{ Pa} - (143075 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa}) \frac{0.059 \text{ m}}{0.104 \text{ m}} \right]}$$

$$\dot{Q}_G = 8.3682 \text{ E} - 08 \text{ m}^3 / \text{s}$$

นำ \dot{Q}_G แทนในสมการที่ (ก.3) จะได้

$$j_G = \frac{8.3682 \text{ E} - 08 \text{ m}^3 / \text{s}}{\frac{\pi}{4} (0.00015 \text{ m})^2} = 4.7354 \text{ m} / \text{s}$$

ภาคผนวก ข.
การตรวจสอบระบบของน้ำ

1. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของน้ำสามารถหาได้จากสมการ

$$f = \frac{\left[P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2) - \rho g z_2 - \frac{\rho k_e V_2^2}{2} \right] [2D]}{L \rho V_2^2} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ

- f คือ ปัจจัยแรงเสียดทานของน้ำ
 P_1 คือ ความดันที่วัดได้ที่ค่าความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa)
 P_2 คือ ความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa)
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, kg/m^3)
 V_1 คือ ความเร็วของน้ำในท่อสแตนเลส(เมตรต่อวินาที, m/s)
 V_2 คือ ความเร็วของน้ำในท่อไมโครแคนเนล (เมตรต่อวินาที, m/s)
 g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง, m/s^2)
 V_2 คือ ความยาวของท่อไมโครแคนเนลและสแตนเลส(เมตร, m)
 k_e คือ Contraction coefficient = 0.475
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อไมโครแคนเนล (เมตร, m)
 L คือ ความยาวของท่อไมโครแคนเนล (เมตร, m)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการที่ (ข.1) จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานเท่ากับ

$$f = \frac{\left[138325\text{Pa} - 101325\text{Pa} + \frac{998\text{kg/m}^3}{2} (0.0210^2\text{ m/s} - 0.2334^2\text{ m/s}) \right] [2 \times 0.00015\text{m}]}{0.104\text{m} \times 998\text{kg/m}^3 \times 0.2334^2\text{ m/s} - 998\text{kg/m}^3 \times 9.81\text{m/s}^2 \times 0.144\text{m} - \frac{998\text{kg/m}^3 \times 0.475 \times 0.334^2\text{ m/s}}{2}}$$

$$f_{\text{exp}} = 1.885$$

2. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของน้ำทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการ

$$f_{theory} = \frac{64}{Re} \quad (ข.2)$$

$$Re = \frac{\rho V_2 D}{\mu} \quad (ข.3)$$

$$\mu = a10^{(b/(T-c))} \quad (ข.4)$$

เมื่อ

a คือค่าคงที่เท่ากับ $2.414 \times 10^{-5} N \cdot s / m^2$

b คือ ค่าคงที่เท่ากับ $247.8 K$ (เคลวิน, K)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน, K)

c คือ 140 (เคลวิน, K)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการที่ (ข.4) จะได้

$$\mu = 2.414 \times 10^{-5} N \cdot s / m^2 \times 10^{(247.8 K / (300.0758 - 140 K))}$$

$$\mu = 0.00085 N \cdot s / m^2$$

นำ μ แทนในสมการที่ (ข.3) จะได้

$$Re = \frac{998 kg / m^3 \times 0.2334^2 m / s \times 0.00015 m}{0.00085 N \cdot s / m^2}$$

$$Re = 40.9836$$

นำ Re แทนในสมการที่ (ข.4) จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานทางทฤษฎีเท่ากับ

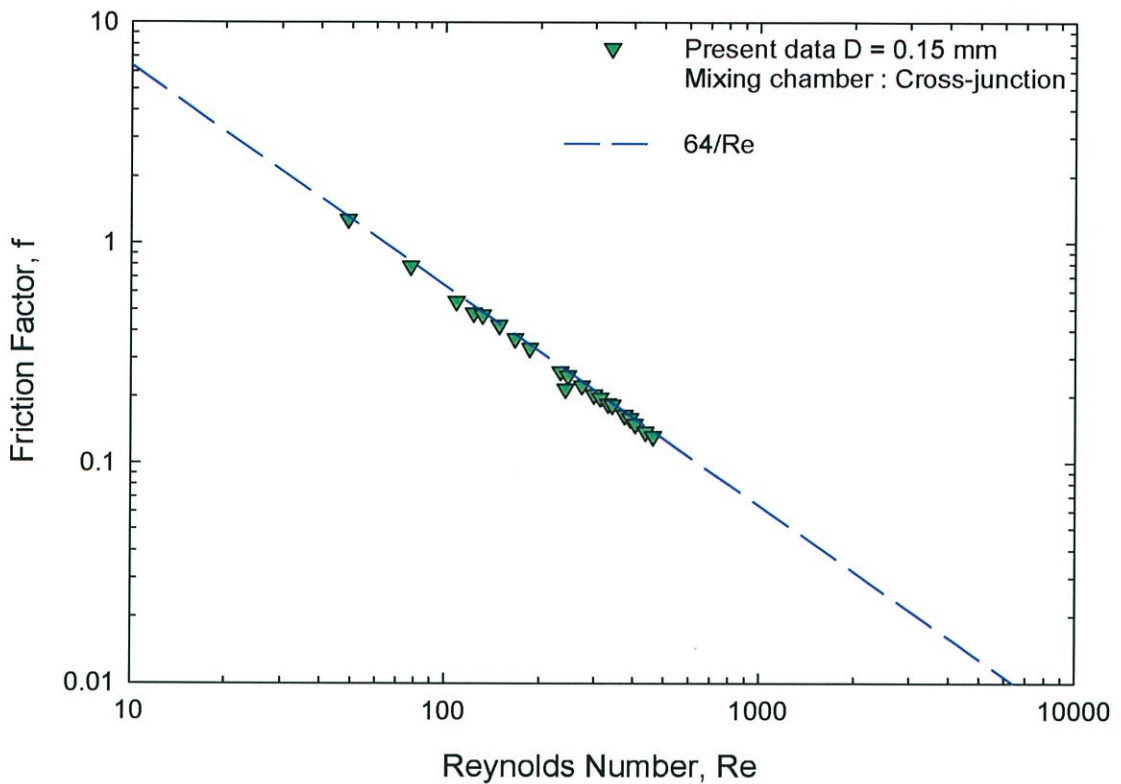
$$f_{theory} = \frac{64}{40.9836} = 1.5615$$

ตารางที่ ข.1 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.29E-06	3.00E-01	0.2999	0.000917	48.9541	1.2740	1.3073
8.392E-06	4.76E-01	0.4758	0.000917	77.6627	0.7852	0.8240
1.171E-05	6.64E-01	0.6637	0.000913	108.7905	0.5440	0.5882
1.332E-05	7.55E-01	0.7551	0.000915	123.5223	0.4804	0.5181
1.431E-05	8.11E-01	0.8112	0.000919	132.1230	0.4724	0.4843
1.608E-05	9.12E-01	0.9116	0.000917	148.7892	0.4229	0.4301
1.807E-05	1.02E+00	1.0247	0.000917	167.2516	0.3674	0.3826
2.013E-05	1.14E+00	1.1416	0.000917	186.3340	0.3329	0.3434
2.614E-05	1.48E+00	1.4824	0.000919	241.4352	0.2168	0.2650
2.512E-05	1.42E+00	1.4242	0.000917	232.4553	0.2606	0.2753
2.668E-05	1.51E+00	1.5126	0.000919	246.3604	0.2498	0.2597
2.965E-05	1.68E+00	1.6813	0.000921	273.2570	0.2247	0.2342
3.228E-05	1.83E+00	1.8301	0.000919	298.0666	0.2037	0.2147
3.386E-05	1.92E+00	1.9201	0.000921	312.0694	0.1979	0.2050
3.584E-05	2.03E+00	2.0322	0.000921	330.2767	0.1859	0.1937
3.716E-05	2.11E+00	2.1071	0.000923	341.7219	0.1830	0.1872
4.066E-05	2.31E+00	2.3053	0.000923	373.8669	0.1649	0.1711
4.252E-05	2.41E+00	2.4112	0.000925	390.2045	0.1589	0.1640

ตารางที่ ข.2 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
4.397E-05	2.49E+00	2.4931	0.000925	403.4575	0.1500	0.1586
4.761E-05	2.70E+00	2.6994	0.000925	436.8422	0.1382	0.1465
5.023E-05	2.85E+00	2.8482	0.000925	460.9308	0.1319	0.1388



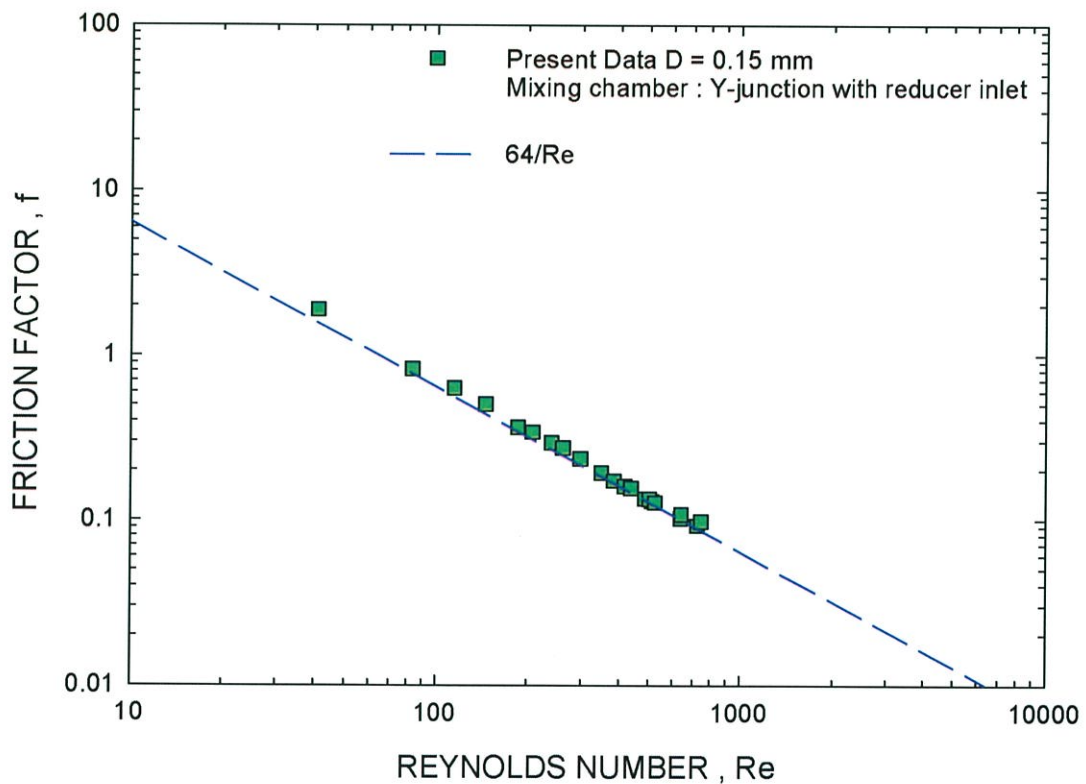
รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ข.3 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
9.8333E-07	0.0050	0.0557	0.005018	9.7496	8.6818	6.5643
4.1166E-06	0.0210	0.2334	0.021008	40.9836	1.8858	1.5615
8.3666E-06	0.0426	0.4744	0.042696	83.2947	0.8241	0.7683
1.1516E-05	0.0587	0.6530	0.058771	114.8891	0.6305	0.5570
1.4616E-05	0.0745	0.8287	0.074591	145.8144	0.5032	0.4389
0.000018	0.0956	1.0631	0.095684	186.6664	0.3644	0.3428
2.0883E-05	0.1065	1.1841	0.106571	207.9049	0.3418	0.3078
2.4066E-05	0.1228	1.3646	0.122816	239.5967	0.2940	0.2671
2.6216E-05	0.1337	1.4865	0.133788	261.0011	0.2743	0.2452
0.000029	0.1520	1.6897	0.152074	297.2819	0.2356	0.2152

ตารางที่ ข.4 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.0116E-05	0.2557	2.8417	0.000849	500.9790	0.1337	0.1277
5.2433E-05	0.2675	2.9730	0.000851	523.0686	0.1274	0.1223
6.3933E-05	0.3262	3.6251	0.000851	637.7912	0.1020	0.1003
0.000064	0.3273	3.6374	0.000851	639.9526	0.1077	0.1000
7.2833E-05	0.3716	4.1297	0.000853	725.0937	0.0921	0.0882
7.4883E-05	0.3821	4.2460	0.000853	745.5025	0.0978	0.0858



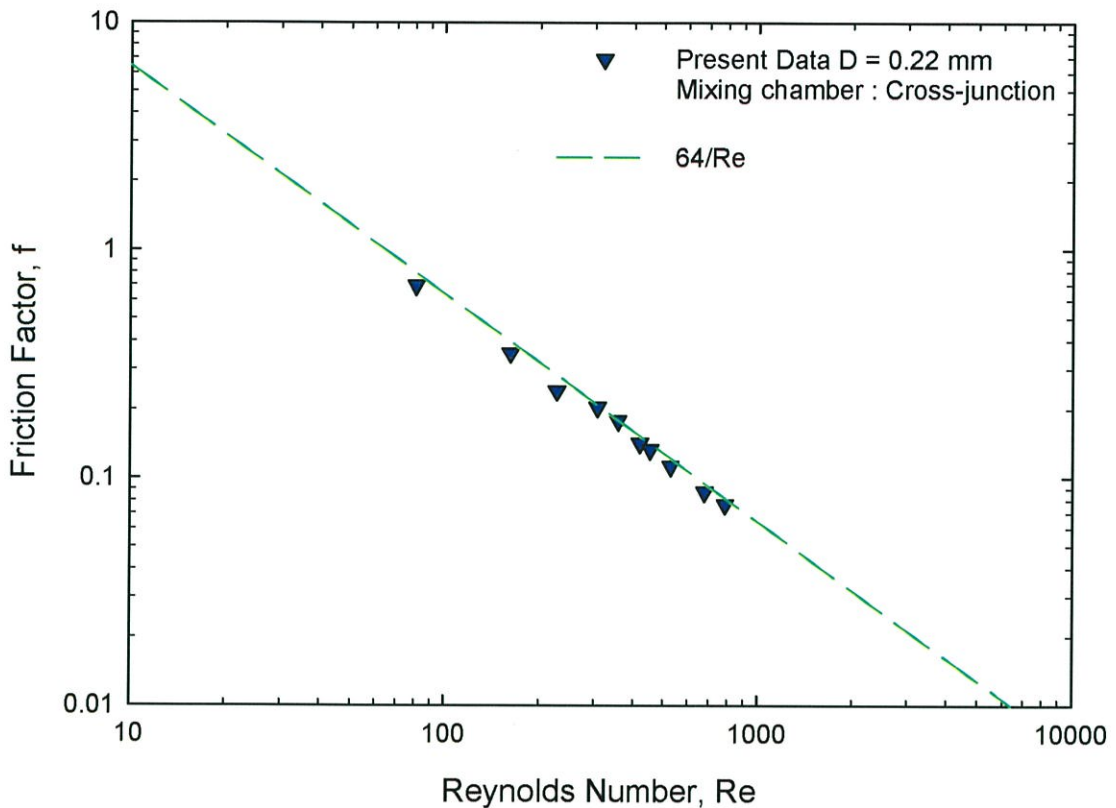
รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ข.5 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.365E-05	0.2787	0.3598	0.000974	81.0862	0.6941	0.7892
2.696E-05	0.5502	0.7105	0.000962	162.2071	0.3533	0.3945
3.759E-05	0.7672	0.9907	0.000958	227.1691	0.2408	0.2817
4.88E-05	0.9960	1.2862	0.000923	305.9497	0.2044	0.2091
5.902E-05	1.2048	1.5558	0.000958	356.7354	0.1782	0.1794
6.936E-05	1.4157	1.8282	0.000955	420.1013	0.1424	0.1523
7.476E-05	1.5260	1.9706	0.000955	452.8383	0.1329	0.1413
8.694E-05	1.7746	2.2916	0.000955	526.5926	0.1126	0.1215
0.0001117	2.2796	2.9438	0.000953	677.9272	0.0869	0.0944
0.0001295	2.6430	3.4130	0.000951	787.6924	0.0766	0.0812

ตารางที่ ข.6 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.365E-05	0.2787	0.3598	0.000974	81.0862	0.6941	0.7892
2.696E-05	0.5502	0.71053	0.000962	162.2071	0.3533	0.3945
3.759E-05	0.7672	0.9907	0.000958	227.1691	0.2408	0.2817
4.88E-05	0.9960	1.2862	0.000923	305.9497	0.2044	0.2091
5.902E-05	1.2048	1.5558	0.000958	356.7354	0.1782	0.1794
6.936E-05	1.4157	1.8282	0.000955	420.1013	0.1424	0.1523
7.476E-05	1.5260	1.9706	0.000955	452.8383	0.1329	0.1413
8.694E-05	1.7746	2.2916	0.000955	526.5926	0.1126	0.1215
0.0001117	2.2796	2.9438	0.000953	677.9272	0.0869	0.0944
0.0001295	2.64304	3.4130	0.000951	787.6924	0.0766	0.08125



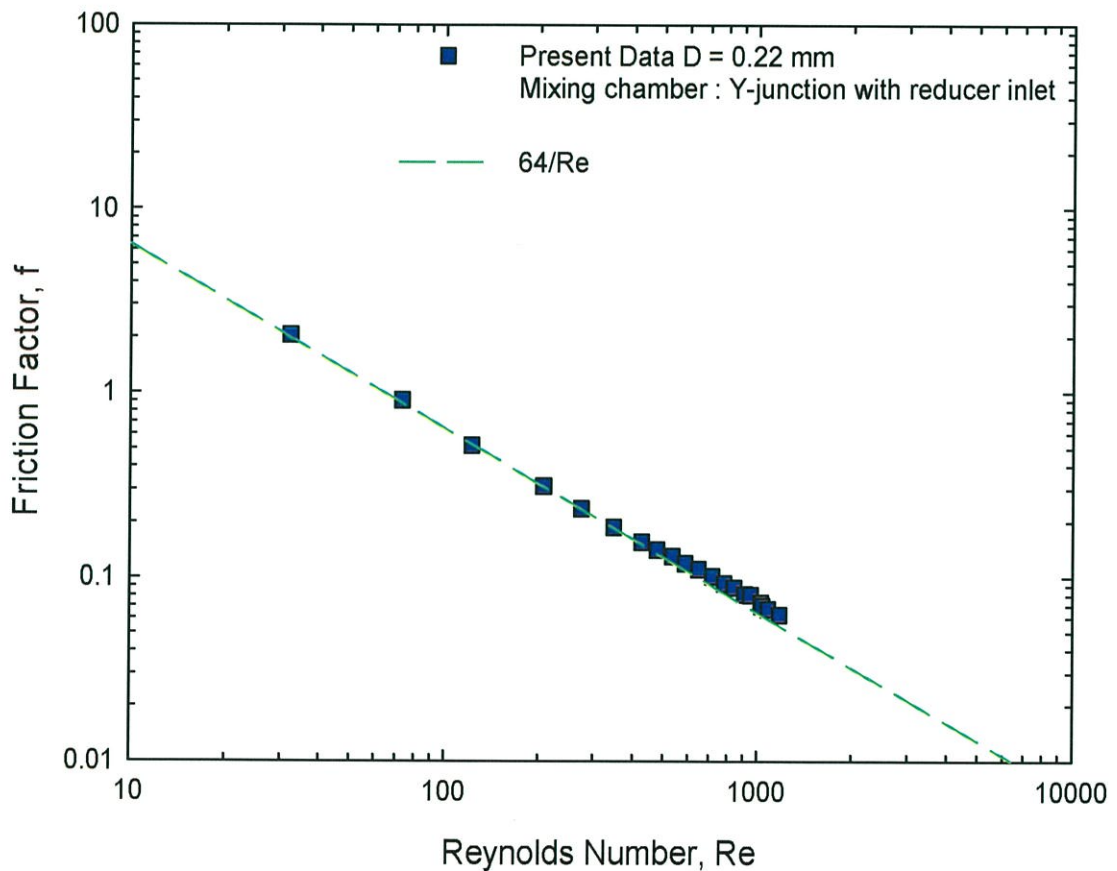
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ข.7 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
9.83333E-07	0.0050	0.0557	0.005018	9.7496	8.6818	6.5643
4.11667E-06	0.0210	0.2334	0.021008	40.9836	1.8858	1.5615
8.36667E-06	0.0426	0.4744	0.042696	83.2947	0.8241	0.7683
1.15167E-05	0.0587	0.6530	0.058771	114.8891	0.6305	0.5570
1.46167E-05	0.0745	0.8287	0.074591	145.8144	0.5032	0.4389
0.00001875	0.0956	1.0631	0.095684	186.6664	0.3644	0.3428
2.08833E-05	0.1065	1.1841	0.106571	207.9049	0.3418	0.3078
2.40667E-05	0.1228	1.3646	0.122816	239.5967	0.2940	0.2671
2.62167E-05	0.1337	1.4865	0.133788	261.0011	0.2743	0.2452
0.0000298	0.1520	1.6897	0.152074	297.2819	0.2356	0.2152

ตารางที่ ข.8 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.01167E-05	0.2557	2.8417	0.000849	500.9790	0.1337	0.1277
5.24333E-05	0.2675	2.9730	0.000851	523.0686	0.1274	0.1223
6.39333E-05	0.3262	3.6251	0.000851	637.7912	0.1020	0.1003
0.00006415	0.3273	3.6374	0.000851	639.9526	0.1077	0.1000
7.28333E-05	0.3716	4.1297	0.000853	725.0937	0.0921	0.0882
7.48833E-05	0.3821	4.2460	0.000853	745.5025	0.0978	0.0858



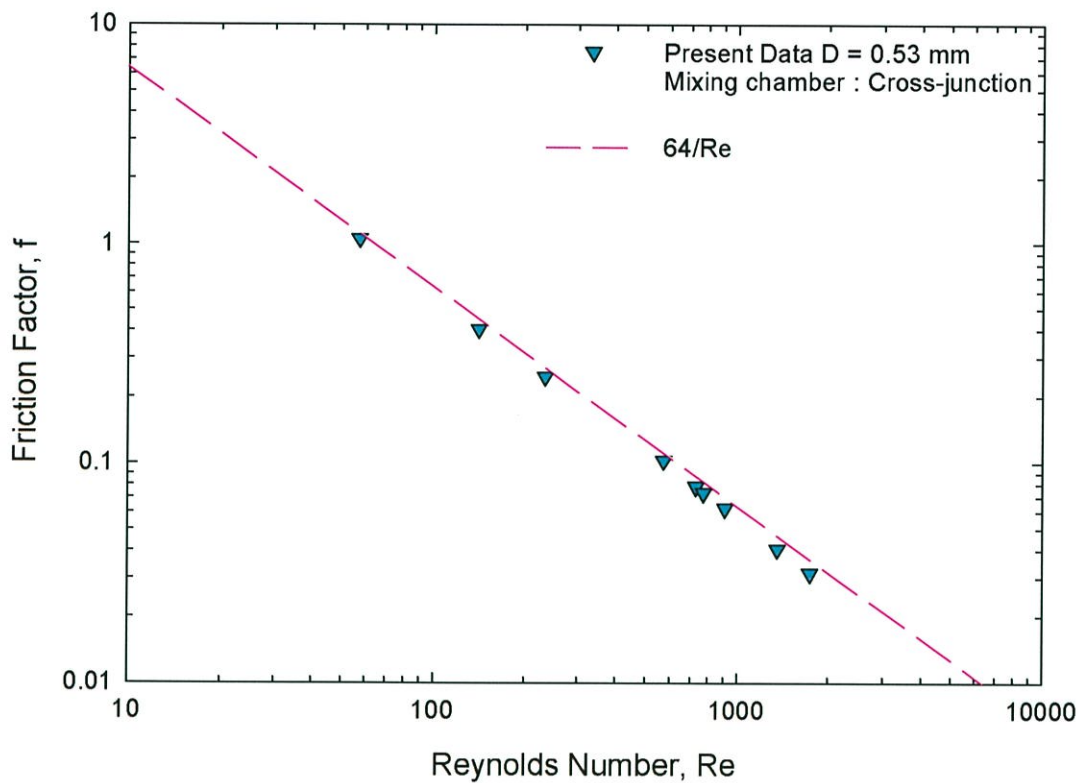
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ข.9 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
2.219E-05	0.1132	0.1007	0.000931	57.26172	1.0500	1.1176
5.453E-05	0.2782	0.2476	0.000933	140.4119	0.4044	0.4558
9.053E-05	0.4620	0.4111	0.000931	233.6054	0.2459	0.2739
0.0002199	1.1219	0.9985	0.000923	572.1858	0.1026	0.1118
0.0002776	1.4164	1.2606	0.000915	728.5356	0.0781	0.0878
0.0002936	1.4980	1.3332	0.000913	772.1715	0.0733	0.0828
0.0003465	1.7679	1.5735	0.000913	911.297	0.0622	0.0702
0.0005149	2.6277	2.3386	0.000909	1360.188	0.0405	0.0470
0.0006593	3.3646	2.9945	0.000908	1745.344	0.0315	0.0366

ตารางที่ ข.10 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
2.219E-05	0.1132	0.1007	0.000931	57.26172	1.0500	1.1176
5.453E-05	0.2782	0.2476	0.000933	140.4119	0.4044	0.4558
9.053E-05	0.4620	0.4111	0.000931	233.6054	0.2459	0.2739
0.0002199	1.1219	0.9985	0.000923	572.1858	0.1026	0.1118
0.0002776	1.4164	1.2606	0.000915	728.5356	0.0781	0.0878
0.0002936	1.4980	1.3332	0.000913	772.1715	0.0733	0.0828
0.0003465	1.7679	1.5735	0.000913	911.297	0.0622	0.0702
0.0005149	2.6277	2.3386	0.000909	1360.188	0.0405	0.0470
0.0006593	3.3646	2.9945	0.000908	1745.344	0.0315	0.0366



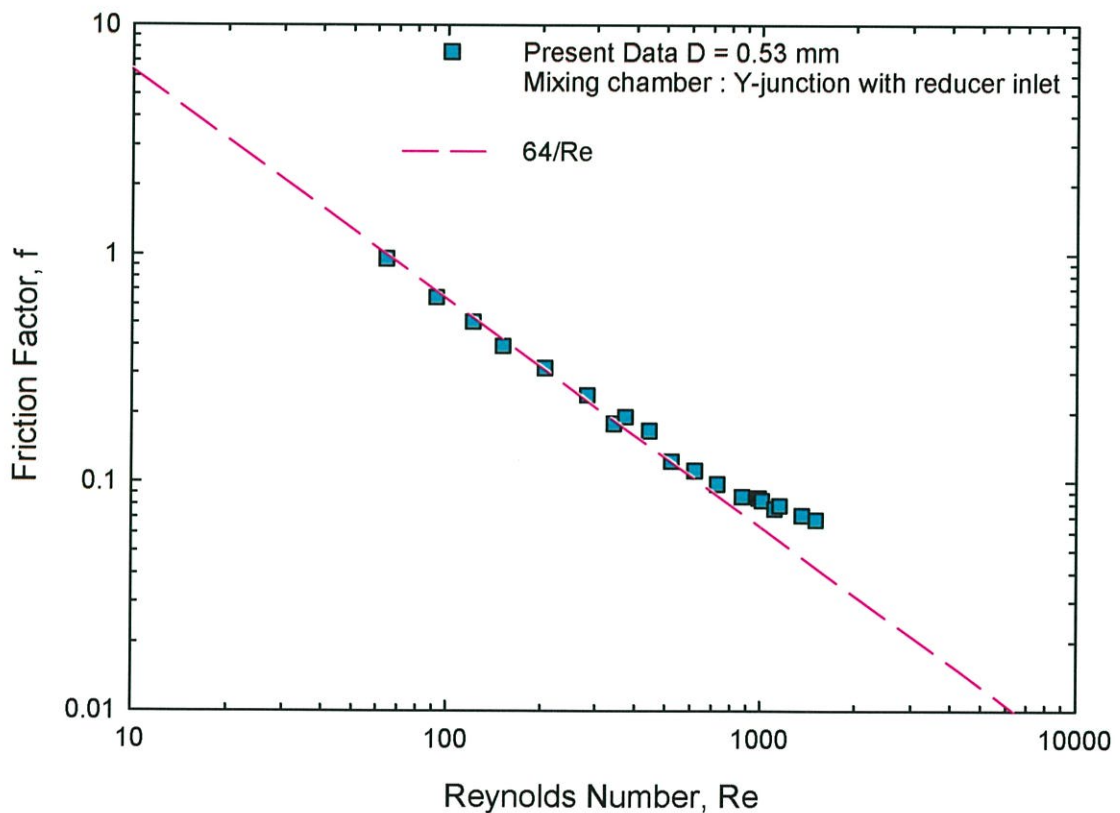
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ข.11 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
9.83333E-07	0.0050	0.0557	0.005018	9.7496	8.6818	6.5643
4.11667E-06	0.0210	0.2334	0.021008	40.9836	1.8858	1.5615
8.36667E-06	0.0426	0.4744	0.042696	83.2947	0.8241	0.7683
1.15167E-05	0.0587	0.6530	0.058771	114.8891	0.6305	0.5570
1.46167E-05	0.0745	0.8287	0.074591	145.8144	0.5032	0.4389
0.00001875	0.0956	1.0631	0.095684	186.6664	0.3643	0.3428
2.08833E-05	0.1065	1.1841	0.106571	207.9049	0.3418	0.3078
2.40667E-05	0.1228	1.3646	0.122816	239.5967	0.2940	0.2671
2.62167E-05	0.1337	1.4865	0.133788	261.0011	0.2743	0.2452
0.0000298	0.1520	1.6897	0.152074	297.2819	0.2356	0.2152

ตารางที่ ข.12 การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

\dot{m} (kg/s)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.01167E-05	0.2557	2.8417	0.000849	500.9790	0.1337	0.1277
5.24333E-05	0.2675	2.9730	0.000851	523.0686	0.1274	0.1223
6.39333E-05	0.3262	3.6251	0.000851	637.7912	0.1020	0.1003
0.00006415	0.3273	3.6374	0.000851	639.9526	0.1077	0.1000
7.28333E-05	0.3716	4.1297	0.000853	725.0937	0.0921	0.0882
7.48833E-05	0.3821	4.2460	0.000853	745.5025	0.0978	0.0858



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การตรวจสอบระบบของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ภาคผนวก ค.
การตรวจสอบระบบของอากาศ

3. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$f = \frac{2\Delta P_{friction} D}{L\rho_{T.S.}V_2^2} \quad (\text{ค.1})$$

$$\Delta P_{friction} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2) - \rho_{T.S.}gz_2 - \Delta P_{inlet} \quad (\text{ค.2})$$

$$\Delta P_{inlet} = \frac{\rho_{T.S.}k_e V_2^2}{2} \quad (\text{ค.3})$$

$$\rho_{T.S.} = \frac{P_{in} + P_{atm}}{2RT} \quad (\text{ค.4})$$

เมื่อ

 f คือ ปัจจัยแรงเสียดทานของอากาศ P_1 คือ ความดันที่วัดได้ที่ค่าความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa) P_2 คือ ความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa) $\rho_{T.S.}$ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้อง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, kg/m³) V_1 คือ ความเร็วของอากาศในท่อสแตนเลส(เมตรต่อวินาที, m/s) V_2 คือ ความเร็วของอากาศในท่อไมโครเซนเนล (เมตรต่อวินาที, m/s) g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง, m/s²) z_2 คือ ความยาวของท่อไมโครเซนเนลและสแตนเลส(เมตร, m) k_e คือ Contraction coefficient = 0.475 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อไมโครเซนเนล (เมตร, m) L คือ ความยาวของท่อไมโครเซนเนล (เมตร, m)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการที่ (ค.4) จะได้ $\rho_{T.S.}$ เท่ากับ

$$\rho_{T.S.} = \frac{211325Pa + 101325Pa}{2 \times 287 \times 297.5885K}$$

$$\rho_{T.S.} = 1.8303 \text{ kg / m}^3$$

นำ $\rho_{T.S.}$ แทนในสมการที่ (ค.3) จะได้

$$\Delta P_{inlet} = \frac{1.6620 \text{ kg / m}^3 \times 0.475 \times 0.2334^2 \text{ m / s}}{2}$$

$$\Delta P_{inlet} = 72.9059$$

นำ ΔP_{inlet} แทนในสมการที่ (ค.2) จะได้

$$\begin{aligned} \Delta P_{friction} = & 138325 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa} + \frac{998 \text{ kg / m}^3}{2} (0.0210^2 \text{ m / s} - 0.2334^2 \text{ m / s}) \\ & - 998 \text{ kg / m}^3 \times 9.81 \text{ m / s}^2 \times 0.144 \text{ m} - 72.9059 \end{aligned}$$

$$\Delta P_{friction} = 78772.5033$$

นำ $\Delta P_{friction}$ แทนในสมการที่ (ค.1) จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานของอากาศเท่ากับ

$$f = \frac{2 \times 78772.5033 \times 0.00015 \text{ m}}{0.104 \times 1.6620 \text{ kg / m}^3 \times 0.2334^2 \text{ m / s}}$$

$$f_{exp} = 8.6818$$

4. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของอากาศทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการ

$$f_{theory} = \frac{64}{Re} \quad (ค.5)$$

$$Re = \frac{\rho V_2 D}{\mu} \quad (ค.6)$$

$$\mu = \frac{aT^{1/2}}{1 + b/T} \quad (ค.7)$$

เมื่อ

a คือค่าคงที่เท่ากับ $1.458 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m.s.k}^{1/2})$

b คือ ค่าคงที่เท่ากับ $110.4K$

T คือ อุณหภูมิ (K)

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการที่ (ค.7) จะได้

$$\mu = 1 \frac{.458 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m.s.k}^{1/2}) \times 295.226K^{1/2}}{1 + 110.4K / 295.226K}$$

$$\mu = 1.82332E - 05 \text{ kg}/(\text{m.s.k}^{1/2})$$

นำ μ แทนในสมการที่ (ค.6) จะได้

$$Re = \frac{1.8303 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 13.5902^2 \text{ m}/\text{s} \times 0.00015 \text{ m}}{1.8233E - 05 \text{ kg}/(\text{m.s.k}^{1/2})}$$

$$Re = 185.8227$$

นำ Re แทนในสมการที่ (ค.5) จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานทางทฤษฎีเท่ากับ

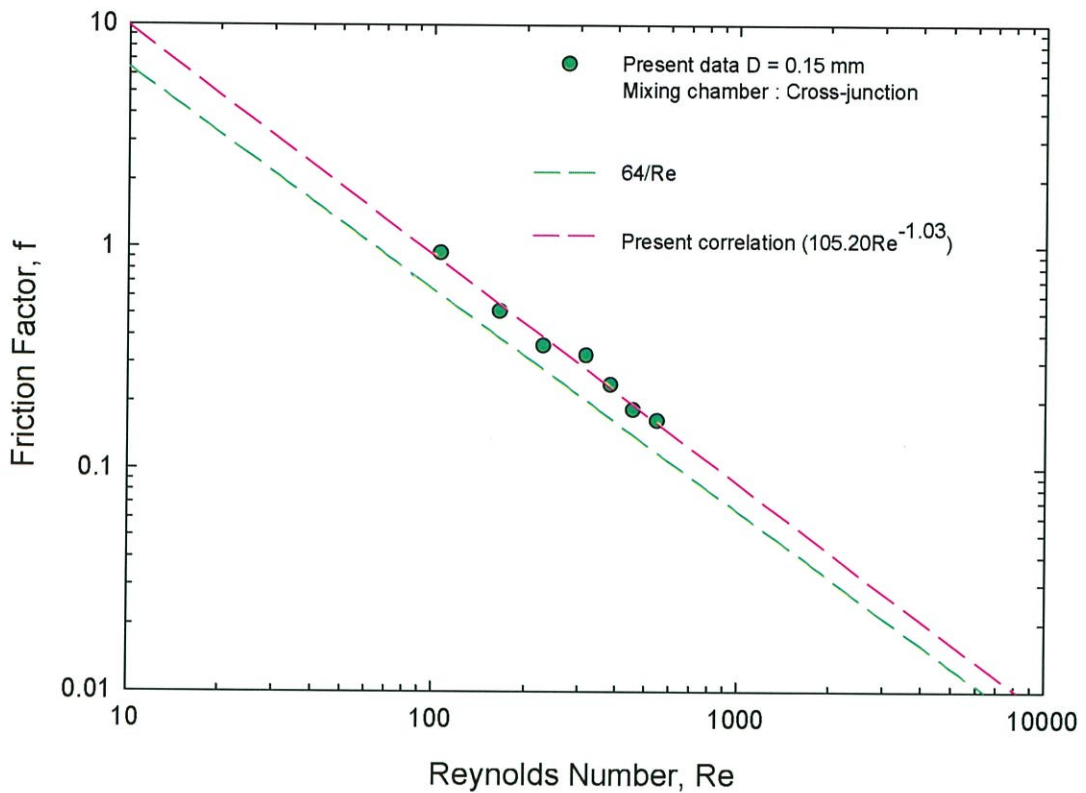
$$f_{theory} = \frac{64}{185.8227} = 0.3444$$

ตารางที่ ค.1 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.629E-07	9.2196	9.2196	1.40963715	106.0550	0.9328	0.6034
2.433E-07	13.7662	13.7662	1.47095111	165.2432	0.5096	0.3873
3.199E-07	18.1033	18.1033	1.54978334	228.9494	0.3563	0.2795
3.931E-07	22.2434	22.2434	1.74631079	316.9024	0.3221	0.2019
4.666E-07	26.4067	26.4067	1.77841746	383.1340	0.2372	0.1670
5.43E-07	30.7301	30.7301	1.81782109	455.7411	0.1827	0.1404
6.092E-07	34.4721	34.4721	1.95062594	548.5868	0.1636	0.1166

ตารางที่ ค.2 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.629E-07	9.2196	9.2196	1.40963715	106.0550	0.9328	0.6034
2.433E-07	13.7662	13.7662	1.47095111	165.2432	0.5096	0.3873
3.199E-07	18.1033	18.1033	1.54978334	228.9494	0.3563	0.2795
3.931E-07	22.2434	22.2434	1.74631079	316.9024	0.3221	0.2019
4.666E-07	26.4067	26.4067	1.77841746	383.1340	0.2372	0.1670
5.43E-07	30.7301	30.7301	1.81782109	455.7411	0.1827	0.1404
6.092E-07	34.4721	34.4721	1.95062594	548.5868	0.1636	0.1166



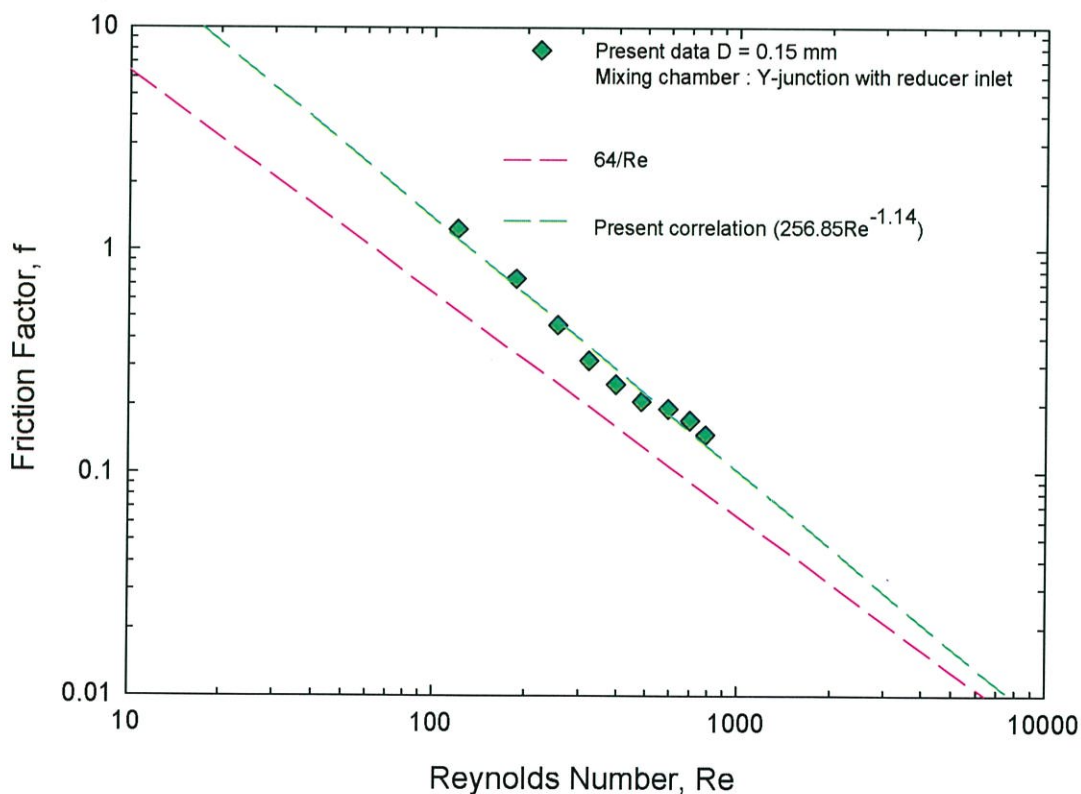
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ค.3 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S}$	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.64252E-07	0.8365	9.2947	1.55756	120.2631	1.2411	0.5321
2.40234E-07	1.2235	13.5944	1.66204	185.8804	0.7397	0.3443
3.17933E-07	1.6192	17.9913	1.71426	253.2908	0.4579	0.2526
3.95097E-07	2.0122	22.3579	1.75534	321.0434	0.3167	0.1993
4.65402E-07	2.3702	26.3363	1.83033	394.1339	0.2478	0.1623
5.34558E-07	2.7224	30.2497	1.94325	480.3944	0.2079	0.1332
5.94205E-07	3.0262	33.6251	2.14782	590.7905	0.1926	0.1083
6.54311E-07	3.3323	37.0264	2.29720	696.1356	0.1712	0.0919
7.16517E-07	3.6491	40.5465	2.36599	784.3792	0.1473	0.0815

ตารางที่ ค.4 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.s}$	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.64252E-07	0.8365	9.2947	1.55756	120.2631	1.2411	0.5321
2.40234E-07	1.2235	13.5944	1.66204	185.8804	0.7397	0.3443
3.17933E-07	1.6192	17.9913	1.71426	253.2908	0.4579	0.2526
3.95097E-07	2.0122	22.3579	1.75534	321.0434	0.3167	0.1993
4.65402E-07	2.3702	26.3363	1.83033	394.1339	0.2478	0.1623
5.34558E-07	2.7224	30.2497	1.94325	480.3944	0.2079	0.1332
5.94205E-07	3.0262	33.6251	2.14782	590.7905	0.1926	0.1083
6.54311E-07	3.3323	37.0264	2.29720	696.1356	0.1712	0.0919
7.16517E-07	3.6491	40.5465	2.36599	784.3792	0.1473	0.0815



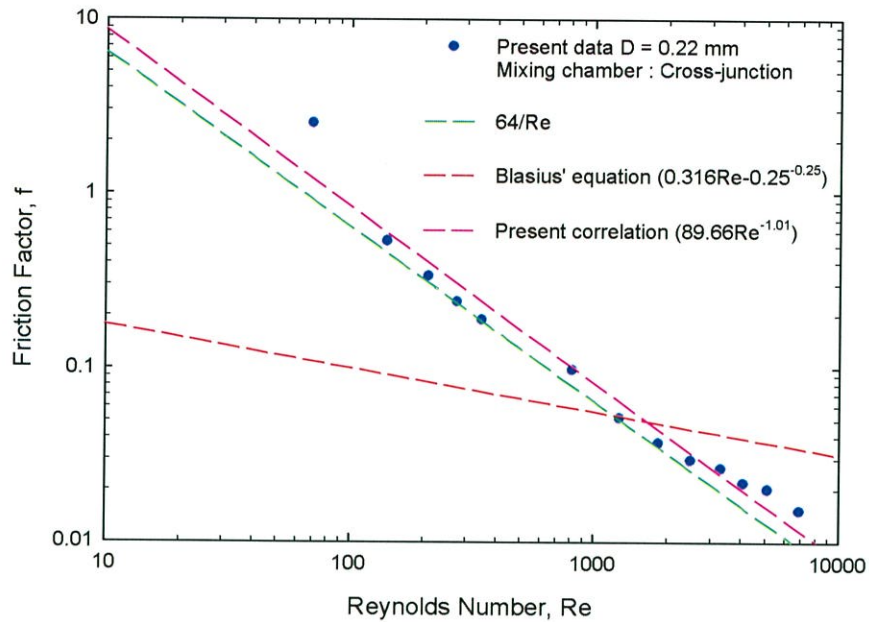
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ค.5 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.69E-07	3.4515	4.45711	1.300187848	69.9056	2.5187	0.9155
3.54E-07	7.2126	9.3138	1.273160798	141.6115	0.5304	0.4519
5.1E-07	10.3995	13.4293	1.306011339	209.5547	0.3339	0.3054
6.59E-07	13.4243	17.3351	1.329709112	275.0116	0.2378	0.2327
8.12E-07	16.5413	21.3602	1.364601982	347.7595	0.1877	0.1840
1.6E-06	32.6235	42.1275	1.626811681	817.8528	0.0970	0.0782
2.35E-06	47.9683	61.9426	1.727705511	1277.4278	0.0513	0.0501
3.06E-06	62.3761	80.5477	1.922040334	1847.5134	0.0368	0.0346
3.7E-06	75.4254	97.3985	2.151824211	2501.1010	0.0293	0.0255
4.22E-06	86.0229	111.0833	2.503107193	3318.9880	0.0262	0.0192
4.79E-06	97.6737	126.1283	2.72278009	4099.2317	0.0217	0.0156
5.23E-06	106.6045	137.6609	3.125756198	5136.2118	0.0199	0.0124

ตารางที่ ค.6 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.69E-07	3.4515	4.45711	1.300187848	69.9056	2.5187	0.9155
3.54E-07	7.2126	9.3138	1.273160798	141.6115	0.5304	0.4519
5.1E-07	10.3995	13.4293	1.306011339	209.5547	0.3339	0.3054
6.59E-07	13.4243	17.3351	1.329709112	275.0116	0.2378	0.2327
8.12E-07	16.5413	21.3602	1.364601982	347.7595	0.1877	0.1840
1.6E-06	32.6235	42.1275	1.626811681	817.8528	0.0970	0.0782
2.35E-06	47.9683	61.9426	1.727705511	1277.4278	0.0513	0.0501
3.06E-06	62.3761	80.5477	1.922040334	1847.5134	0.0368	0.0346
3.7E-06	75.4254	97.3985	2.151824211	2501.1010	0.0293	0.0255
4.22E-06	86.0229	111.0833	2.503107193	3318.9880	0.0262	0.0192
4.79E-06	97.6737	126.1283	2.72278009	4099.2317	0.0217	0.0156
5.23E-06	106.6045	137.6609	3.125756198	5136.2118	0.0199	0.0124



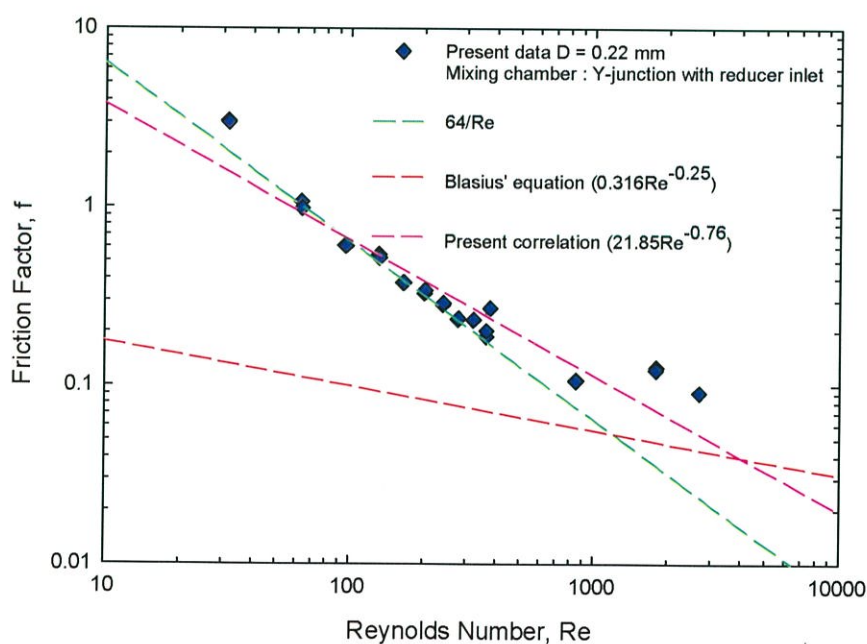
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ค.7 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
8.2699E-08	0.4211	2.1755	1.207273	31.3585	3.0442	2.04091
1.6532E-07	0.8420	4.3491	1.21853	63.2589	1.0708	1.011715
2.4794E-07	1.2627	6.5224	1.230557	95.8289	0.6100	0.667857
3.3079E-07	1.6847	8.7021	1.262174	131.1064	0.5439	0.488153
4.1295E-07	2.1031	10.8634	1.269848	164.7038	0.3765	0.388576
4.9437E-07	2.5178	13.0052	1.294996	201.1296	0.3279	0.318203
5.7822E-07	2.9448	15.2111	1.318704	239.6093	0.2827	0.267101
6.5948E-07	3.3587	17.3488	1.33181	275.9984	0.23517	0.231885
7.4052E-07	3.7714	19.4808	1.375929	320.26	0.23258	0.199838
8.3361E-07	4.2455	21.9296	1.384087	362.8316	0.1887	0.17639
8.3401E-07	4.2475	21.9400	1.385402	363.6141	0.1884	0.176011
1.5843E-06	8.0690	41.6790	1.698689	847.3667	0.1070	0.075528
2.0232E-06	10.3041	53.2239	2.816939	1794.421	0.1259	0.035666
2.5103E-06	12.7852	66.0394	3.400881	2688.034	0.0912	0.023809

ตารางที่ ค.8 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S.}$	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
8.2824E-08	0.4218	2.1788	1.210038	31.5390	2.9961	2.0292
1.6595E-07	0.8452	4.3658	1.219084	63.6686	0.9833	1.0052
2.4825E-07	1.2643	6.5307	1.233673	96.3805	0.6069	0.6640
3.3208E-07	1.6913	8.7360	1.263251	132.0504	0.5202	0.4846
4.1330E-07	2.1049	10.8727	1.274197	165.771	0.3776	0.3860
4.9305E-07	2.5111	12.9706	1.303385	202.2878	0.3422	0.3163
5.7727E-07	2.9400	15.1860	1.325276	240.8164	0.2897	0.2657
6.5949E-07	3.3587	17.3490	1.336221	277.3888	0.2366	0.2307
7.4033E-07	3.7704	19.4756	1.379566	321.4116	0.2338	0.1991
8.2661E-07	4.2099	21.7453	1.397803	363.6141	0.2019	0.1760
8.1092E-07	4.1299	21.3326	1.474397	376.2587	0.2705	0.1700
1.5879E-06	8.0873	41.7735	1.693236	846.1495	0.1059	0.0756
2.0444E-06	10.4120	53.7811	2.781147	1787.988	0.1224	0.0357



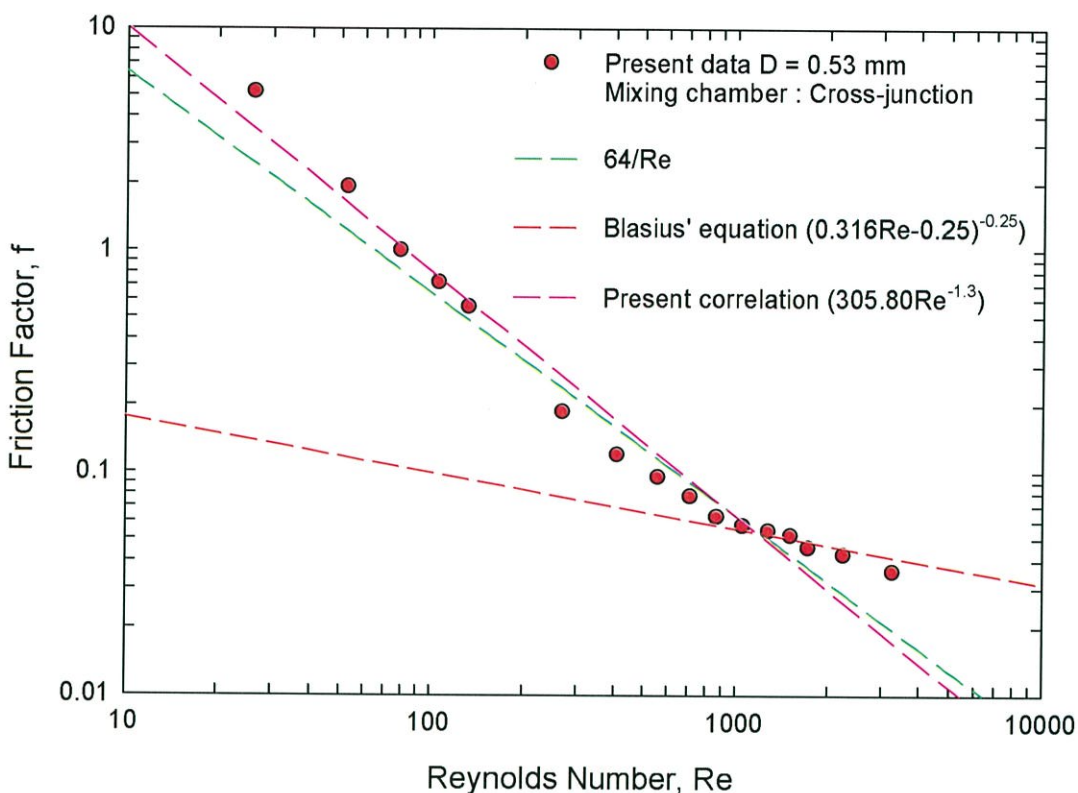
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ค.9 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S}$	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.67E-07	0.8499	0.7564	1.197543895	26.2621	5.1376	2.4369
3.34E-07	1.6999	1.5129	1.200484096	52.6512	1.9246	1.2155
5.01E-07	2.5528	2.2720	1.201954196	79.1668	0.9949	0.8084
6.7E-07	3.4117	3.0364	1.204894397	106.0604	0.7149	0.6034
8.39E-07	4.2745	3.8042	1.207834599	133.2034	0.5555	0.4804
1.69E-06	8.5872	7.6426	1.213715001	268.9008	0.1871	0.2380
2.54E-06	12.9482	11.5238	1.224005704	408.8984	0.1199	0.1565
3.42E-06	17.4382	15.52	1.23870671	557.3068	0.0951	0.1148
4.32E-06	22.0073	19.5864	1.254207826	712.4796	0.0775	0.0898
5.22E-06	26.5910	23.6659	1.265976138	868.9552	0.0627	0.0736
6.21E-06	31.6484	28.1670	1.289512761	1053.4510	0.0574	0.0607
7.32E-06	37.2762	33.1757	1.323769171	1274.0531	0.0544	0.0502
8.39E-06	42.7301	38.0296	1.362028395	1502.6695	0.0520	0.0425
9.45E-06	48.1047	42.8130	1.384101025	1719.0921	0.0457	0.0372
1.16E-05	59.1109	52.6085	1.479749086	2258.3898	0.0425	0.0283
1.51E-05	77.0612	68.5842	1.650444088	3283.8253	0.0358	0.0194

ตารางที่ ค.10 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S}$	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.67E-07	0.8499	0.7564	1.197543895	26.2621	5.1376	2.4369
3.34E-07	1.6999	1.5129	1.200484096	52.6512	1.9246	1.2155
5.01E-07	2.5528	2.2720	1.201954196	79.1668	0.9949	0.8084
6.7E-07	3.4117	3.0364	1.204894397	106.0604	0.7149	0.6034
8.39E-07	4.2745	3.8042	1.207834599	133.2034	0.5555	0.4804
1.69E-06	8.5872	7.6426	1.213715001	268.9008	0.1871	0.2380
2.54E-06	12.948	11.523	1.224005704	408.8984	0.1199	0.1565
3.42E-06	17.438	15.52	1.23870671	557.3068	0.0951	0.1148
4.32E-06	22.007	19.586	1.254207826	712.4796	0.0775	0.0898
5.22E-06	26.591	23.665	1.265976138	868.9552	0.0627	0.0736



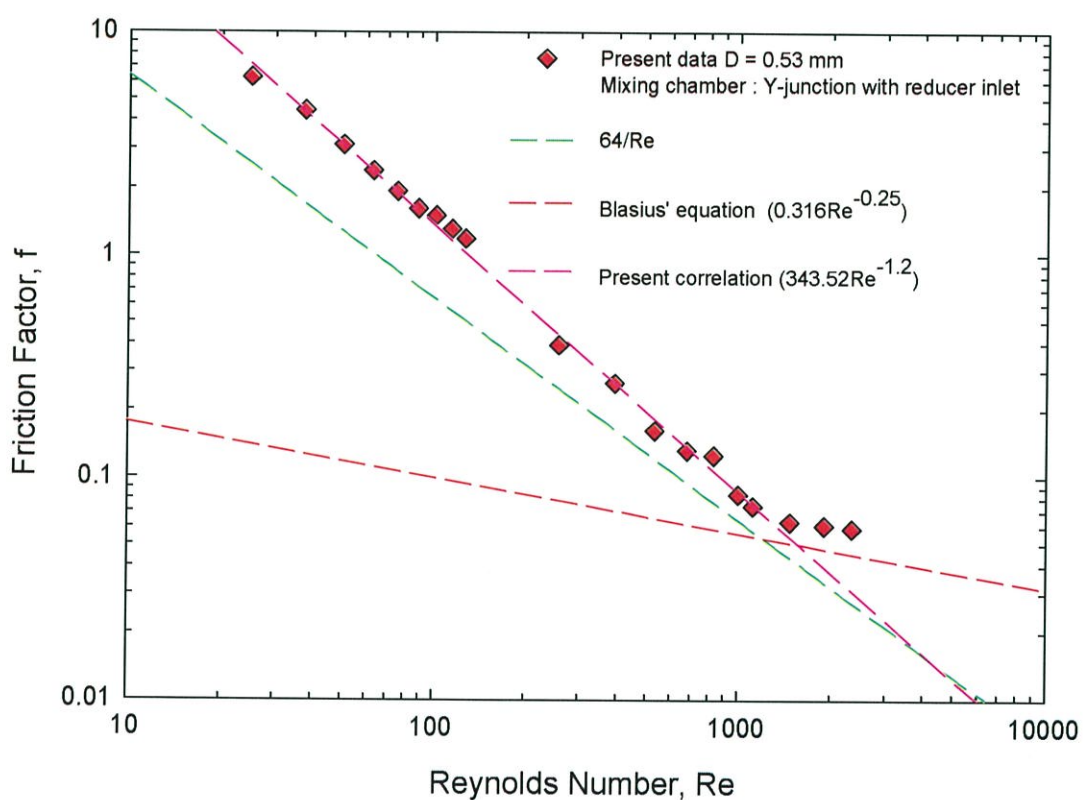
รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ ค.11 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.64204E-07	0.3716	0.7442	1.86E-05	24.9767	6.2365	2.562388
2.46302E-07	0.5575	1.1164	1.86E-05	37.5747	4.4283	1.703274
3.28396E-07	0.7433	1.4885	1.86E-05	50.1968	3.1087	1.274981
4.10487E-07	0.9291	1.8606	1.86E-05	62.8674	2.3833	1.018017
4.92572E-07	1.1149	2.2326	1.86E-05	75.5861	1.9274	0.846716
5.74651E-07	1.3007	2.6047	1.86E-05	88.353	1.6152	0.724367
6.56394E-07	1.4857	2.9752	1.86E-05	101.264	1.5039	0.632011
7.38766E-07	1.6722	3.3486	1.86E-05	114.193	1.3063	0.560456
8.18872E-07	1.8535	3.7117	1.86E-05	126.881	1.184	0.504411
1.64397E-06	3.7211	7.4516	1.86E-05	256.814	0.3934	0.249208

ตารางที่ ค.12 การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.s.}$	$V_1(m/s)$	$V_2(m/s)$	μ_{air}	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
6.01011E-06	13.6041	27.2421	1.86E-05	999.474	0.0836	0.0640
6.65264E-06	15.0584	30.1545	1.86E-05	1116.26	0.0742	0.0573
8.4145E-06	19.0465	38.1405	1.86E-05	1470.02	0.063	0.0435



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การตรวจสอบระบบของอากาศในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของห้องผสมแบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

ประวัติผู้เขียน



ชื่อผู้เขียน นาย กฤติน ธาราสุข
 วันเดือนปีเกิด วันที่ 6 เมษายน 2533
 สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร
 ที่อยู่ 6 ถนน โชคชัย 4 ซอย โชคชัย 4 ซอย 54 แยก 9 แขวง ลาดพร้าว เขต
 ลาดพร้าว จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ 10230

ประวัติการศึกษา

- ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ปีการศึกษา 2554
- ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2558

ผลงานและกิจกรรม

- ได้รับตำแหน่งเดือนสถาบัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ปีการศึกษา 2551
- ได้รับรางวัลการนำเสนอบทความวิจัยภาคบรรยายยอดเยี่ยม จากการประชุมวิชาการระดับชาติสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ 2557

ประวัติการทำงาน

- คณะกรรมการสโมสรนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ปีการศึกษา 2552
- ฝึกงานบริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ในหน่วยงานวิศวกรซ่อมบำรุง (ENMM) ในปี 2554
- ศึกษานมหาลัยโตไก (Tokai University) ที่ประเทศญี่ปุ่น ในปี 2554

ประวัติผู้เขียน(ต่อ)

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์

- Krittin Tharasook, Sira Saisorn, Somchai Wongwises. Two-Phase Flow Patterns in Horizontal and Vertical Micro-Channels. The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi.
- กฤติน ธาราสุก, ศิระ สายสร, สมชาย วงศ์วิเศษ. รูปแบบการไหลสองสถานะในท่อไมโครแชนแนลแนวนอนและแนวตั้ง. การประชุมวิชาการสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ 2557, 30 เมษายน 2557 ณ โรงแรมโพธิ์รังสี ถนนสุขุมวิท 26 กรุงเทพฯ
- Krittin Tharasook, Sira Saisorn. Effects of Mixing chamber on Adiabatic Two - Phase Water - Air Flow in Vertical Micro - Channels. The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering 17-19th December 2014, The Empress, Chiang Mai.