



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของรูปทรงห้องผสมที่มีต่อการไหลสองเฟสในท่อขนาดไมโครที่วางตัวใน

แนวตั้ง

The effects of mixing chamber geometry on two-phase flow in vertical micro-channels

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริระ สายสร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

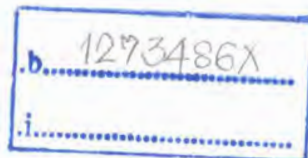
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

RCH

๕441๗

255๗

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**140093**  
วันเดือนปี.....**11 S.ค. 2558**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ผลของรูปทรงห้องผสมที่มีต่อการไหลสองเฟสในท่อขนาดไมโครที่วางตัวในแนวตั้ง

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร.ศิริระ สายสร

สาขาวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลของห้องผสมที่มีต่อการไหลสองสถานะแบบอะเดียแบติกของน้ำ - อากาศที่ไหลในท่อไมโครแชนแนลซึ่งวางตัวในแนวตั้ง (Effects of Mixing Chamber on Adiabatic Two - Phase Water - Air Flow in Vertical Micro - Channels) การทดสอบนี้ใช้ท่อไมโครแชนแนล (Micro - Channels) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร โดยมีความยาว 104, 120 และ 320 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งมีอากาศ (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 จากการนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากัน ที่มี mixing chamber ต่างกัน การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า mixing chamber มีผลต่อรูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่างและความดันลด

คำสำคัญ: ท่อไมโครแชนแนล / การไหลสองสถานะ / รูปแบบการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

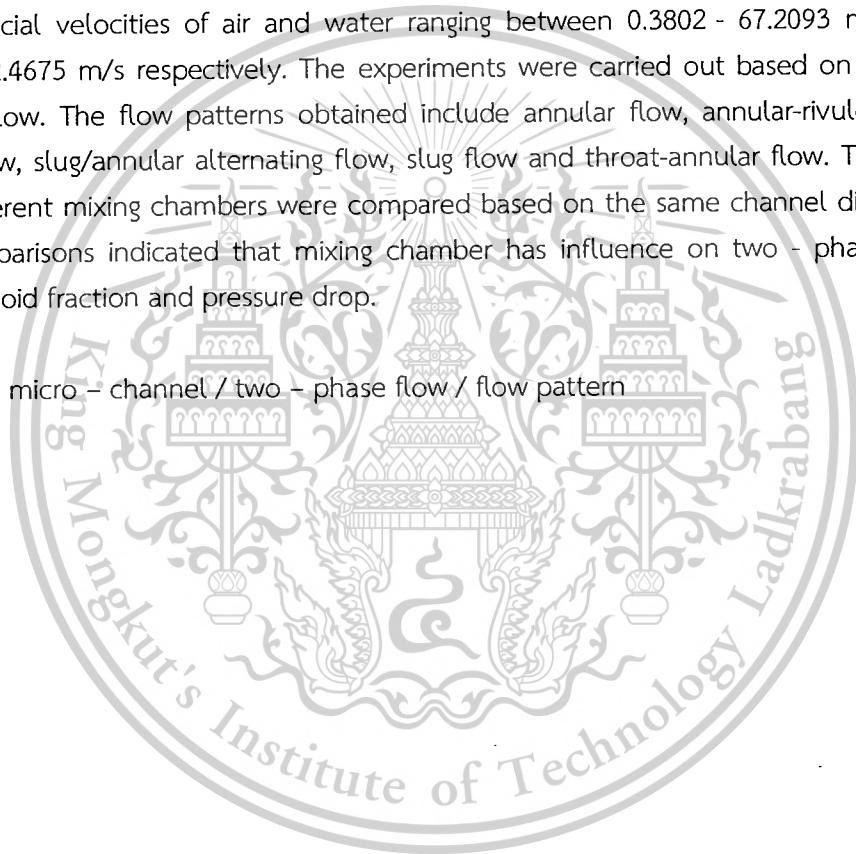
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**Research Title:** The effects of mixing chamber geometry on two-phase flow in vertical micro-channels  
**Researcher:** Asst.Prof.Dr.Sira Saisorn  
**Faculty:** KMITL PCC

#### ABSTRACT

In this study, effects of mixing chamber on adiabatic two - phase air - water flow in vertical micro - channels were investigated. 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 were 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 were 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 data from different mixing chambers were compared based on the same channel diameter. The comparisons indicated that mixing chamber has influence on two - phase flow pattern, void fraction and pressure drop.

**Keyword:** micro - channel / two - phase flow / flow pattern



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557

ผศ.ดร.ศิระ สายศรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
รายการสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 สํารวจเอกสาร	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 หลักการและพื้นฐานทางวิชาการ	
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
3.2 แผนภูมิแสดงรูปแบบการไหล	9
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	10
4.1.1 รายละเอียดส่วนประกอบ	11
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	13
4.3 ข้อควรระวังในการทดลอง	23
บทที่ 5 ผลการทดลอง	
5.1 รูปแบบการไหลที่ได้จากการทดลอง	25
5.2 สัดส่วนช่องว่าง	59
5.3 ความดันลด	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	
6.1 สรุปผลการทดลอง	75
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต	77
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก ก	82
ภาคผนวก ข	84
ภาคผนวก ค	99
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	117
ข้อมูลประวัติผู้วิจัย	118



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร โดย Saisorn และ Wongwises	4
2.2	ภาพสเก็ตรูปแบบการไหล โดย Saisorn และ Wongwises	4
2.3	แผนภูมิระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับคุณภาพปริมาตร โดย Saisorn และ Wongwises	5
2.4	รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร โดย Saisorn และ Wongwises	5
2.5	แสดงรูปการไหลที่เกิดขึ้นในท่อแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)	6
3.1	Bubbly Flow	7
3.2	Plug Flow	7
3.3	Stratified Flow	7
3.4	Wavy Flow	7
3.5	Slug Flow	8
3.6	Annular Flow	8
3.7	แผนภูมิรูปแบบการไหล	9
4.1	ไดอะแกรมของระบบ	10
4.2	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 1	13
4.3	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 2	13
4.4	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3	14
4.5	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 4	15
4.6	แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 5	16
4.7	แสดงส่วนการทดสอบ	17
4.8	แสดงชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะ แบบ Cross-junction	17
4.9	แสดงชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะ แบบ Y-junction with reducer inlet	18
4.10	แสดงตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ	19
4.11	แสดงเกจวัดความดัน	19
4.12	แสดงจอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิตอล	20
4.13	แสดงตัวแปลงสัญญาณความดัน	20
4.14	แสดงตัวควบคุมความดัน	21
4.15	แสดงถังเก็บน้ำ	21
4.16	แสดงปั๊มลม	22
4.17	แสดงกล่องจุลทรรศน์	22
4.18	แสดงเครื่องชั่งตวงวัด 3 ตำแหน่ง (Electronic Balance)	22
4.19	แสดงการใช้งานตัวควบคุมความดัน	23
4.20	แสดงช่วงความดันที่เกจแต่ละตัวรับได้	24
5.1	รูปแบบการไหล $\varnothing 0.15$ มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction	25
5.2	รูปแบบการไหล $\varnothing 0.15$ มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
5.3	รูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction	27
5.4	รูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	28
5.5	รูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction	29
5.6	รูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	30
5.7	แผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตร	32
5.8	แผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตร	33
5.9	แผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตร	34
5.10	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตร	35
5.11	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตร	35
5.12	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตร	36
5.13	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับงานของSaisorn และ Wongwises $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตร	37
5.14	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับงานของSaisorn และ Wongwises $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตร	38
5.15	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับงานของSaisorn และ Wongwises $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตร	39
5.16	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตรกับงานของBaker	40
5.17	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตรกับงานของBaker	41
5.18	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตรกับงานของBaker	42
5.19	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตรกับงานของ Garimella และ คณะ	43
5.20	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตรกับงานของ Garimella และ คณะ	44
5.21	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตรกับงานของ Garimella และ คณะ	45
5.22	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตรกับงานของ Wei Li และ คณะ	46
5.23	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตรกับงานของ Wei Li และ คณะ	47
5.24	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตรกับงานของ Wei Li และ คณะ	48
5.25	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตรกับงานของ Kawaji และ คณะ	49
5.26	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตรกับงานของ Kawaji และ คณะ	50
5.27	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตรกับงานของ Kawaji และ คณะ	51
5.28	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตรกับงานของ Waelchi และ von Rohr	52
5.29	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.22$ มิลลิเมตรกับงานของ Waelchi และ von Rohr	53
5.30	เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล $\emptyset 0.53$ มิลลิเมตรกับงานของ Waelchi และ von Rohr	54
5.31	ข้อมูลสัดส่วนช่องว่าง $\emptyset 0.15, 0.22$ และ $0.53$ มิลลิเมตร	60
5.32	ความดันลด $\emptyset 0.15$ มิลลิเมตร	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.33 ความดันลด $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร	64
5.34 ความดันลด $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร	65
5.35 ความดันลดจากแรงเสียดทาน $\varnothing$ 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร	66
5.36 Two-phase frictional multiplier ที่มีรูปแบบการไหลต่างๆ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร	69
5.37 Two-phase frictional multiplier ที่มี mass flux ต่างๆ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร	70
5.38 Two-phase frictional multiplier ที่มีรูปแบบการไหลต่างๆ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร	71
5.39 Two-phase frictional multiplier ที่มี mass flux ไหลต่างๆ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร	72
5.40 Two-phase frictional multiplier ที่มีรูปแบบการไหลต่างๆ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร	73
5.41 Two-phase frictional multiplier ที่มี mass flux ต่างๆ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร	74
1 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction	88
2 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	90
3 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction	92
4 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	94
5 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction	96
6 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	98
7 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตรของ mixing chamber แบบ Cross-junction	104
8 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	106
9 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตรของ mixing chamber แบบ Cross-junction	108
10 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	111
11 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตรของ mixing chamber แบบ Cross-junction	114
12 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ ท่อไมโครแขนเนล $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	87
2 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	88
3 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	89
4 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	90
5 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	91
6 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	92
7 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	93
8 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	94
9 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	95
10 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	96
11 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	97
12 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	98
13 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	103
14 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	103
15 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	105
16 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. ๑๑๖

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
17 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	107
18 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	107
19 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	109
20 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	110
21 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	112
22 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	113
23 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 บาร์	115
24 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศ $\varnothing$ 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 10 บาร์	115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 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
$\rho_{air}$	ความหนาแน่นของอากาศ , $kg/m^3$
$\rho_{water}$	ความหนาแน่นของน้ำ , $kg/m^3$
$\rho_G$	ความหนาแน่นของก๊าซ , $kg/m^3$
$\rho_L$	ความหนาแน่นของของเหลว , $kg/m^3$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

การศึกษาการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศ ภายในท่อไมโครแชนเนลถูกดำเนินการศึกษาอย่างแพร่หลายโดยนักวิจัยหลายท่าน เนื่องมาจากการพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็ก (Compact Heat Exchanger), ระบบระบายความร้อน สำหรับคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เป็นต้น จะต้องออกแบบระบบให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ การหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด มีการทำงานด้วยประสิทธิภาพที่สูง และไม่มี ความดันตกมากเกินไปล้วนแต่ต้องอาศัยข้อมูลและความเข้าใจในระบบที่มีการไหลแบบสองสถานะมีนักวิจัยหลายท่านพยายามเสนอหลักเกณฑ์การระบุขนาดของท่อไมโครแชนเนลไว้พอสมควร โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ แม้ว่าจะมีหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ถูกนำเสนอออกมา แต่ก็ยังไม่มีข้อยุติที่ชัดเจนว่า ท่อไมโครแชนเนลควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แน่นอนเท่าใด

เพื่อให้ได้หลักเกณฑ์ที่ชัดเจนสำหรับท่อไมโครแชนเนล การศึกษาวิจัยต่อยอดเพิ่มเติมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากยังมีข้อมูลรูปแบบการไหลภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลขึ้นในแนวตั้งอยู่น้อย ดังนั้นจึงควรมีการทำความเข้าใจและศึกษารูปแบบการไหลภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลในแนวตั้งมากขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษารูปแบบการไหลสองสถานะของอากาศและน้ำในท่อไมโครแชนเนลโดยการถ่ายภาพดูรูปแบบและลักษณะการไหล
2. เพื่อสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหล (Flow Pattern Map) สำหรับการไหลสองสถานะของอากาศและน้ำภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลขึ้นในแนวตั้ง
3. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของความดันตกของอากาศและน้ำในท่อไมโครแชนเนลในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ใยของผสมคือ อากาศและน้ำ เป็นสารทำงาน
2. ท่อทดสอบที่ใช้ทำจากฟิวส์ซิลิกา(Fuse Silica) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง คือ 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร
3. ท่อถูกวางในแนวตั้งโดยสารทำงานไหลขึ้น
4. Mixing chamber ที่ใช้ทดสอบมี 2 ชนิด คือ Cross-junction และ Y-junction with reducer inlet

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้สามารถเข้าใจรูปแบบการไหลสองสถานะของอากาศและน้ำภายในท่อไมโครแชนเนลที่ไหลขึ้นในแนวตั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร
2. สามารถสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหล ของการไหลสองสถานะของอากาศและน้ำในท่อไมโครแชนเนลที่วางในแนวตั้งได้
3. ทำให้สามารถเข้าใจความดันลดของการไหลสองสถานะของอากาศและน้ำในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### สำรวจเอกสาร

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Triplett et al. (1999a,1999b) ทำงานวิจัยเรื่องการไหลสองสถานะของอากาศและน้ำภายในท่อไมโครแชนเนล(Gas-Liquid Two-Phase Flow in Micro-Channels) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับ รูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่าง และความดันลด โดยใช้อากาศและน้ำเป็นสารทำงานที่ไหลผ่านชุดทดลองซึ่งทำจากอะคริลิก(Acrylic) และโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate)ซึ่งชุดทดลองเป็นท่อแบบวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสองขนาดด้วยกันคือ 1.1 และ 1.45 มิลลิเมตรและ ท่อแบบกึ่งสามเหลี่ยมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง1.09 และ 1.49 มิลลิเมตร มีความยาว 200 มิลลิเมตรมีลักษณะการวางท่อในแนวราบมีการนำเสนอ ความดันลดสองสถานะของแต่ละรูปแบบการไหล

Kawahara et al. (2002) ได้ทำการทดลอง การไหลสองสถานะ ภายในท่อซิลิกา(Silica) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ยาว 64.5 มิลลิเมตร ที่วางในแนวระดับ โดยใช้ไนโตรเจนและน้ำเป็นของไหลทดสอบช่วงที่ใช้ในการทดสอบ ความเร็วของอากาศและน้ำอยู่ในช่วง 0.1 - 60เมตรต่อวินาที และ 0.02 - 4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยทำการศึกษารูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่าง (Void Fractions) และค่าความดันลด

S. saisor and S. wongwises (2008) ศึกษาการไหล สัดส่วนช่องว่าง และความดันลด สองสถานะของก๊าซและของเหลวในท่อไมโครแชนเนลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตรโดยใช้น้ำกลั่น, น้ำ, ไนโตรเจน, อากาศ เป็นสารทำงานความเร็วของก๊าซ และ ของเหลว มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.37 - 16 เมตรต่อวินาทีและ 0.005 - 3.04 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

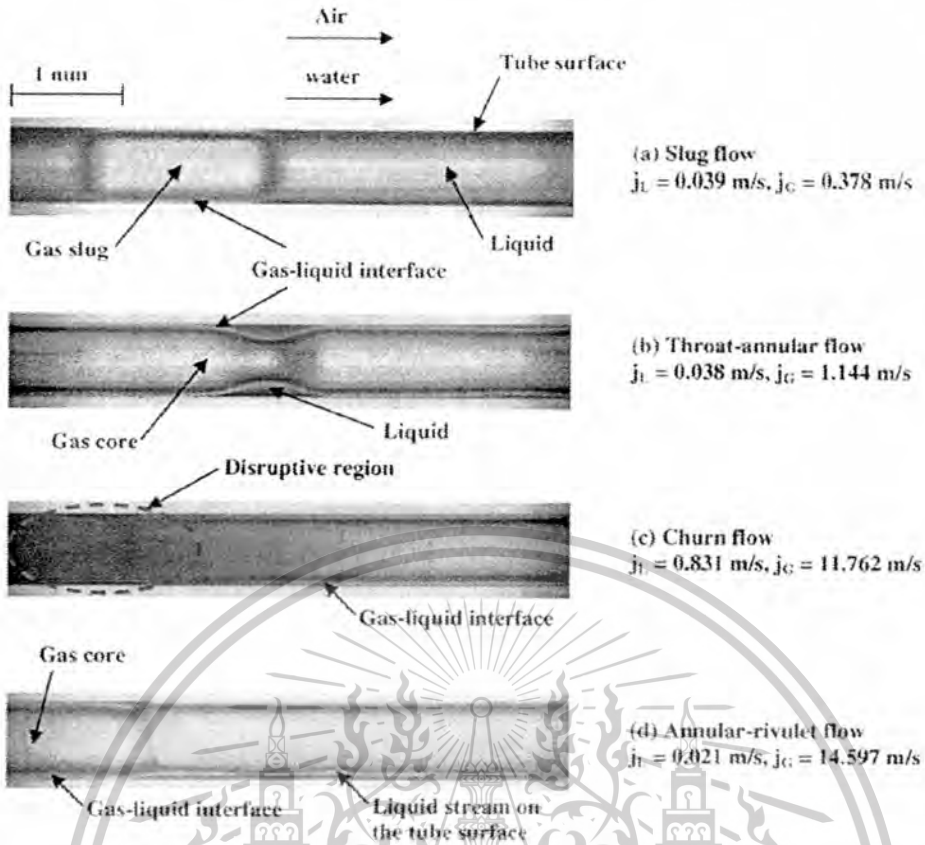
S. saisor and S. wongwises (2010) ได้ศึกษาผลของขนาดท่อที่มีผลต่อรูปแบบการไหล สัดส่วนช่องว่าง และความดันลด ของการไหลสองสถานะของน้ำและอากาศ โดยใช้ท่อพีวีซีซิลิกา มีขนาด 0.15, 0.22, 0.53 มิลลิเมตรโดยมีความยาว 104,120,320 มิลลิเมตรตามลำดับ ในการทดลองใช้ความเร็วของอากาศ ในช่วง 0.37 - 42.36 เมตรต่อวินาทีความเร็วของน้ำ ในช่วง 0.005 - 3.04 เมตรต่อวินาทีและได้สร้างภาพการไหล และ รูปแบบการไหล นำไปสู่การทำนาย ปัจจัยแรงเสียดทาน (Two - Phase Frictional Multiplier)

S. saisor and S. wongwises (2011) ใช้ท่อทำจากซิลิกาผสมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางคือ 0.53 มิลลิเมตร และ 0.15 มิลลิเมตรที่ใช้ในการทดสอบสัดส่วนช่องว่าง ข้อมูลสำหรับท่อทั้งสองจะได้รับการวิเคราะห์ภาพ สำหรับท่อขนาดใหญ่ที่มีสัดส่วนช่องว่างพบว่าการสัมพันธ์เชิงเส้นปริมาตรที่มีคุณภาพ

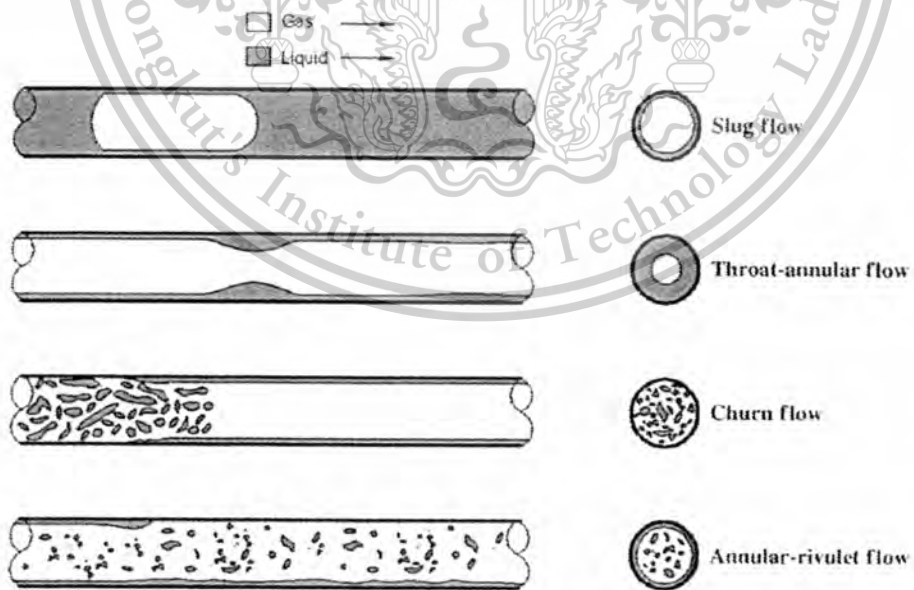
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร โดย Saisorn และ Wongwises (2008)

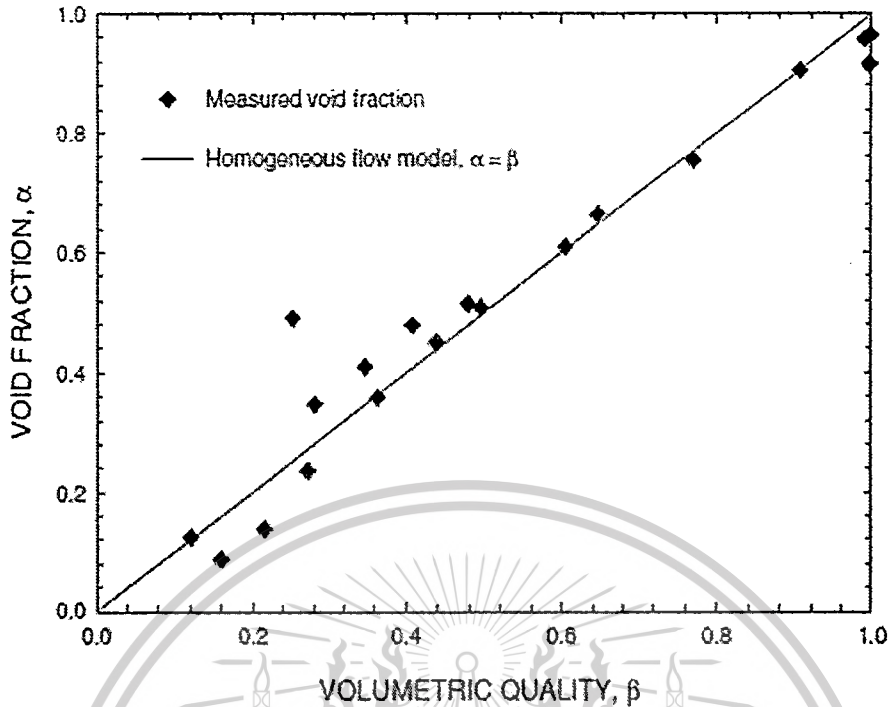


รูปที่ 2.2 ภาพสเก็ตรูปแบบการไหล โดย Saisorn และ Wongwises (2008)

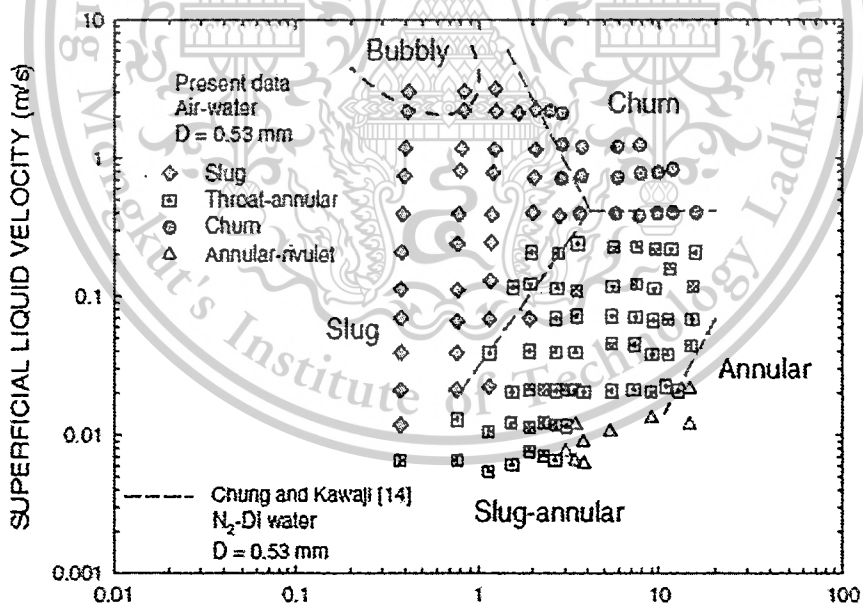
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 แผนภูมิระหว่างสัดส่วนช่องว่างกับคุณภาพปริมาตร โดย Saisorn และ Wongwises (2008)

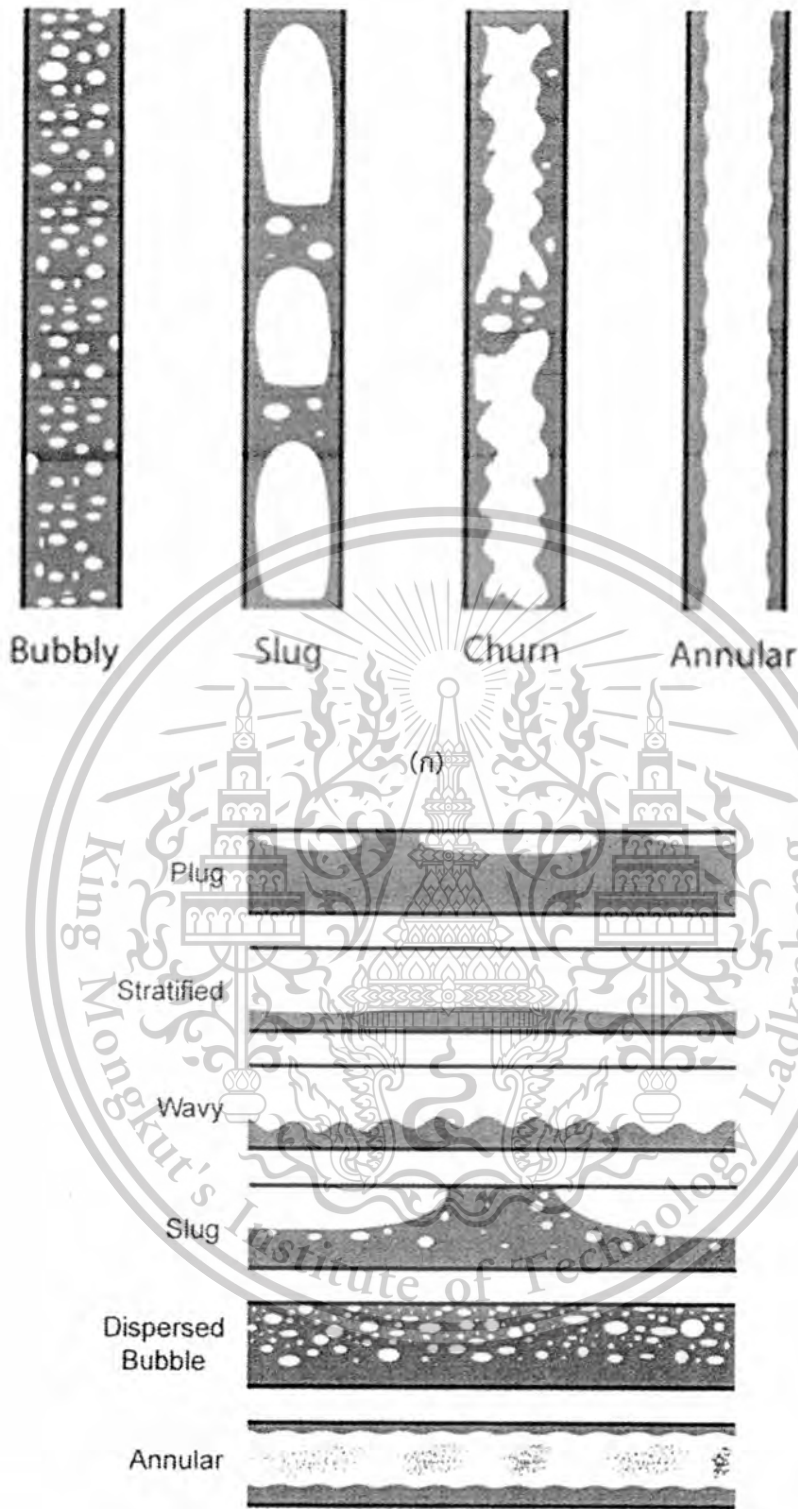


รูปที่ 2.4 รูปแบบการไหลในท่อกลมขนาด 0.53 มิลลิเมตร โดย Saisorn และ Wongwises (2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ข)

รูปที่ 2.5 แสดงรูปการไหลที่เกิดขึ้นในท่อแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข) (<http://scielo.br>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

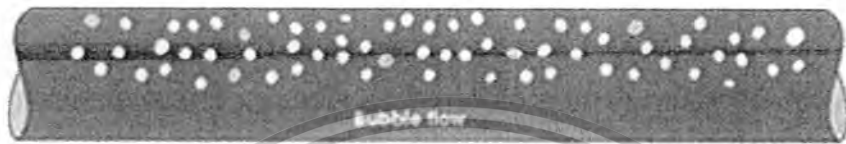
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3 หลักการและพื้นฐานทางวิชาการ

### 3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบการไหลสองสถานะที่มักพบเห็นในท่อไมโครแชนเนล มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 Bubbly Flow (<http://www.globalspec.com>)



รูปที่ 3.2 Plug Flow (<http://www.globalspec.com>)



รูปที่ 3.3 Stratified Flow (<http://www.globalspec.com>)



รูปที่ 3.4 Wavy Flow (<http://www.globalspec.com>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 Slug Flow (<http://www.globalspec.com>)



รูปที่ 3.6 Annular Flow (<http://www.globalspec.com>)

Bubbly Flow (รูปที่ 3.1) รูปแบบการไหลนี้ ในส่วนของก๊าซจะมีลักษณะเป็นฟองขนาดเล็กกระจายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว สำหรับการไหลในแนวนอน ส่วนที่เป็นฟองอากาศส่วนใหญ่จะไหลอยู่ด้านบนของท่อและอาจจะมีการรวมตัวกันของอากาศ

Plug Flow (รูปที่ 3.2) รูปแบบการไหลนี้มีลักษณะเฉพาะ คือ ก๊าซจะมีการรวมตัวกันเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ รูปร่างคล้ายกระสุนปืนไหลอยู่ด้านบนของท่อและถูกล้อมด้วยของเหลว

Stratified Flow (รูปที่ 3.3) รูปแบบการไหลนี้ จะมีการแยกชั้นระหว่างของเหลวและก๊าซอย่างชัดเจน โดยที่ของเหลวจะรวมกันที่ด้านล่างของท่อ และก๊าซจะไปรวมตัวที่ด้านบนของท่อ รูปแบบการไหลนี้เกิดแรงโน้มถ่วงกระทำกับของไหลอย่างสมบูรณ์

Wavy Flow (รูปที่ 3.4) รูปแบบการไหลนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของก๊าซในการไหลแบบแยกชั้นมีค่ามากขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของก๊าซและของเหลว บางครั้งเรียกรูปแบบการไหลนี้ว่า การไหลแบบแยกชั้นผิวคลื่น (Stratified-Wavy Flow)

Slug Flow (รูปที่ 3.5) รูปแบบการไหลนี้ ที่ผิวของเหลวซึ่งไหลด้านล่างของท่อ จะเกิดคลื่นขนาดใหญ่จนสามารถไปสัมผัสผิวด้านบนของท่อ ทำให้ในส่วนของของก๊าซด้านบนท่อเกิดสลัก ที่มีผิวด้านหนึ่งอยู่ติดกับผนังท่อ โดยมีของเหลวมาคั่น

Annular Flow (รูปที่ 3.6) รูปแบบการไหลนี้ จะเกิดชั้นของเหลวไหลเป็นวงแหวนรอบๆผนังท่อ ความหนาของชั้นฟิล์มของของเหลวด้านล่างจะหนากว่าด้านบน ผิวด้านในของท่อจะมีก๊าซไหลอยู่ในแกนกลางของท่อ และอาจจะพบหยดของเหลวขนาดเล็กอยู่ในแกนกลางของท่อเรียกว่าฟองของเหลว (Liquid Entrainment) กระจายอยู่ในแกนกลางของท่อ

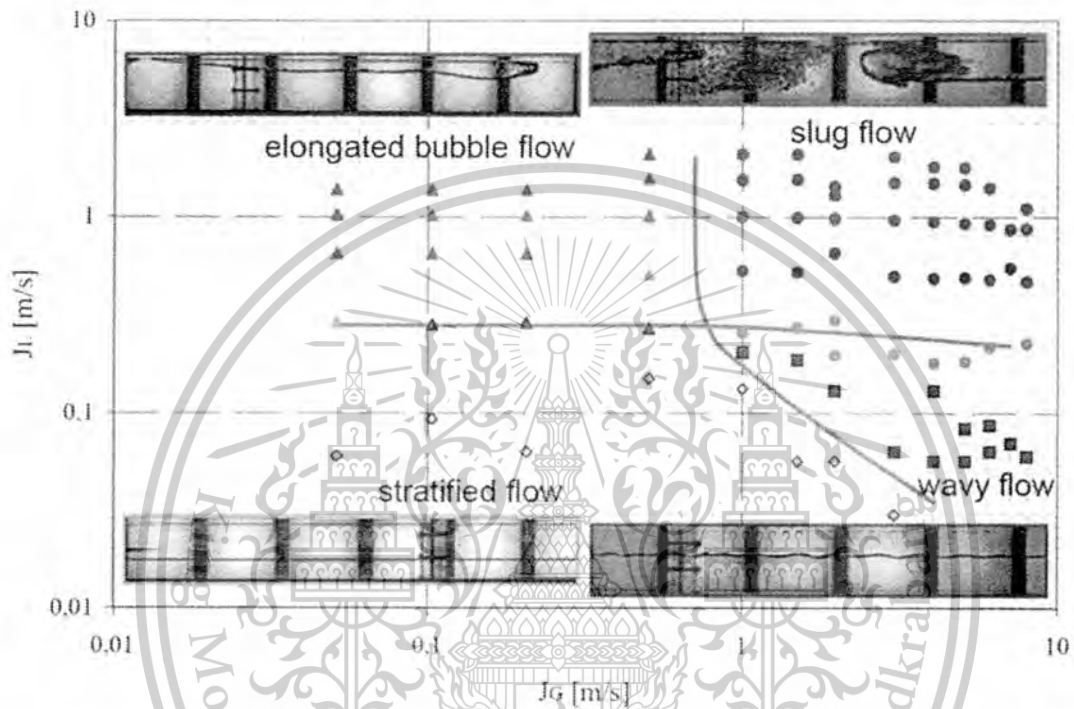
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2 แผนภูมิแสดงรูปแบบการไหล

แผนภูมิรูปแบบการไหลถูกสร้างขึ้นมาจากข้อมูลที่ได้จากการสังเกตรูปแบบการไหลผ่านการทำให้มองเห็นการไหล ( Flow Visualization ) และถูกนำเสนอในเทอมของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น รูปที่ 3.7 เป็นแผนภูมิแสดงรูปแบบการไหลซึ่งถูกนำเสนอในเทอมของความเร็วของอากาศ ( Gas Superficial Velocity,  $j_g$  ) และความเร็วของน้ำ (Liquid Superficial Velocity,  $j_L$  )



รูปที่ 3.7 แผนภูมิรูปแบบการไหล (<http://www.fzd.de>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

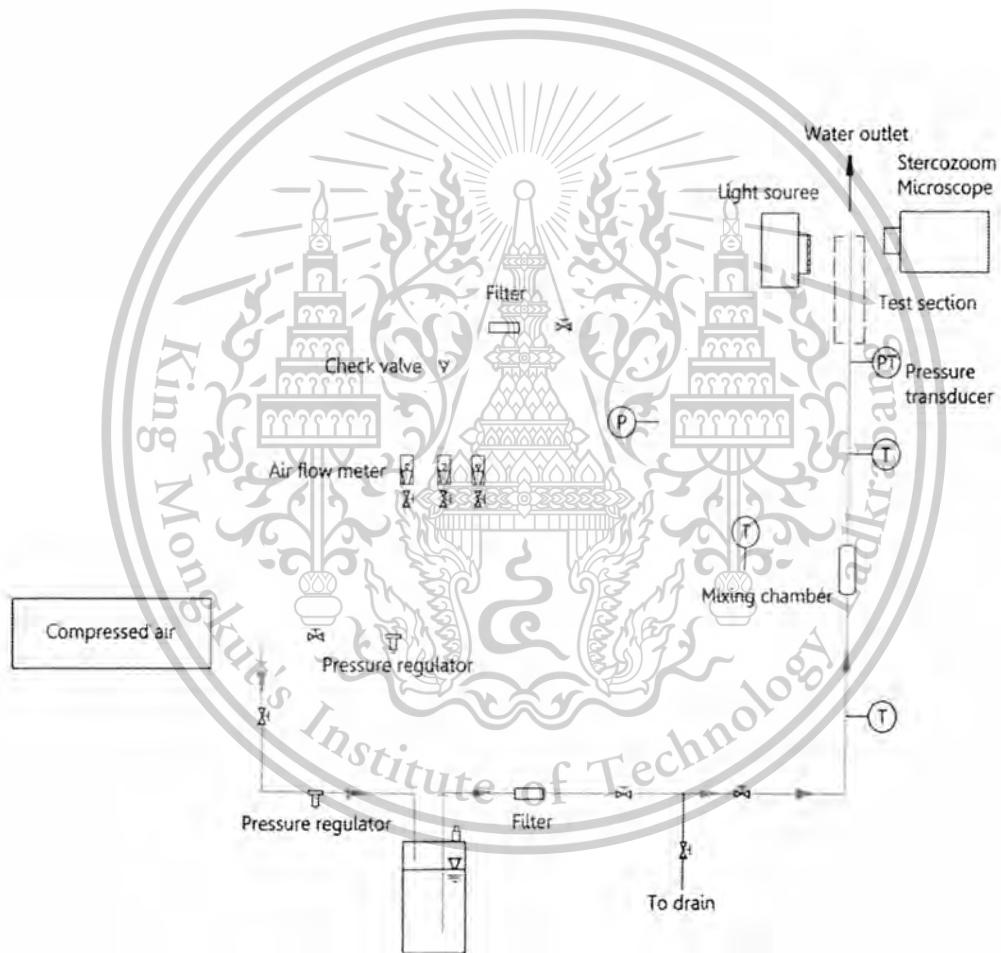
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย

### 4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองบางอย่างมีความละเอียดอ่อนในการใช้งาน หากใช้ไม่ถูกต้องอาจทำให้เสียหายได้ง่ายมาก ดังนั้นจึงควรศึกษาคู่มือของอุปกรณ์แต่ละชิ้นให้ละเอียด ก่อนทำการทดลองเพื่อไม่ให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายจากการใช้งานไม่ถูกประเภท



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมของระบบ เส้นสีเหลืองคืออากาศ, เส้นสีฟ้าคือน้ำ, เส้นสีเขียวคือน้ำกับอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content and cite the document when use.

อากาศที่ไหลออกจากปั๊มลม( Air Compressor )จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ที่วาล์วแยก 2 ทาง อากาศส่วนหนึ่งจะไหลผ่านตัวควบคุมความดัน( Pressure Regulator )เข้าถึงเก็บน้ำ ( Liquid Tank ) ไปดันน้ำในถังเก็บน้ำ ให้ไหลผ่านตัวกรอง (Filter )เพื่อกรองสิ่งสกปรกต่างๆก่อนไหลเข้าสู่ผสมน้ำ และอากาศให้เป็นสองสถานะ( Mixing Chamber )และอากาศอีกส่วนหนึ่งที่ถูกแยกออกที่วาล์ว แยก 2 ทาง จะไหลผ่านตัวควบคุมความดันเพื่อปรับความดันให้คงที่ก่อนไหลเข้าตัวปรับอัตราการไหลของ อากาศ( Air Flow Meter )ที่ตัวปรับอัตราการไหลของอากาศนี้ เราจะใช้ปรับค่าความเร็วของอากาศ ก่อนเข้าไปผสมกับน้ำที่ชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะเข้าส่วนการทดสอบซึ่งก่อนที่ของผสมนี้ ไหลเข้าส่วนการทดสอบเราทำการติดตั้งตัววัดความดัน ( Pressure Tab )เพื่อที่จะอ่านค่าความดันและ อุณหภูมิจากตัวแปลงสัญญาณความดัน( Pressure Transducer )และ จอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิทัล ( TemperatureDigitalDisplay )ตามลำดับ เมื่อไหลผ่านตัววัดความดันจะไหลเข้าส่วนการทดสอบ และ ไหลออกสู่บรรยากาศ ซึ่งส่วนปลายของท่อไมโครแคนเนล ทำการลอกโพลีเอไมด์( Polyimide)ออก เพื่อให้ภาพที่ถ่ายออกมาชัดเจนขึ้น โดยในการถ่ายภาพเราจะติดตั้งสปอร์ตไลท์( Halogen Lamp ) และอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ เพื่อสังเกตรูปแบบการไหลภายในท่อไมโครแคนเนล

#### 4.1.1 รายละเอียดส่วนประกอบ

เครื่องมือสำหรับการทดลองมีอุปกรณ์และส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. ท่อแก้วทนความดัน เรียกท่อนี้ว่าส่วนการทดสอบ ทำมาจากพิวส์ซิลิกา ที่เคลือบโพลีเอไมด์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับท่อ แต่ในการทดลองเราจำเป็นต้องล้างเอาโพลีเอไมด์ ออก เพื่อถ่ายภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งท่อนี้เป็นส่วนสำคัญมากในการทดลอง ท่อแก้วทนความดันนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมากมายหลายขนาด ซึ่งขนาดที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ 0.53 มิลลิเมตร
2. ชุดรองรับท่อแก้วทนความดัน มีไว้เพื่อเป็นฐานรองรับส่วนการทดสอบเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ส่วนการทดสอบเกิดการเสียหายได้ง่าย
3. ถังเก็บน้ำใช้สำหรับบรรจุน้ำ เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งถังเก็บน้ำทำมาจากสแตนเลส เพื่อป้องกันการเกิดสนิมซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกรทดลองได้ และมีฝาสำหรับเปิด-ปิด เพื่อสะดวกในการทำความสะดวกถังเก็บน้ำ
4. ชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะทำหน้าที่ในการผสมน้ำและอากาศ เข้าด้วยกัน ก่อนที่จะไหลเข้าส่วนการทดสอบซึ่งชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะที่ดี จะต้องสามารถพาของไหลให้ไหลผ่านท่อไมโครแคนเนลได้อย่าง นุ่มนวลและไม่มีการไหลย้อนกลับ โดยขนาดปริมาตรและรูปทรงของชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะ จะมีผลอย่างมากต่อการไหลภายในระบบ
5. ท่อสายยางทนแรงดัน แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ใช้งานเกี่ยวกับระบบน้ำและกับระบบ อากาศโดยท่ออย่างจะต้องสามารถทนความดันสูงสุดของระบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

6. ตัวแปลงสัญญาณความดัน เราจะติดตั้ง ก่อนที่อากาศและน้ำจะไหลเข้าส่วนการทดสอบ เพื่อวัดความดันที่ทางเข้าของท่อไมโครแชนเนล
7. ปั๊มลมมีหน้าที่เพิ่มแรงดันให้กับระบบ โดยจะเพิ่มแรงดันในถังเก็บน้ำ ให้ไหลตัวแปลงสัญญาณความดันและ ส่วนการทดสอบขณะเดียวกันจะทำหน้าที่จ่ายแก๊สหรืออากาศ เข้าไปยังระบบ เพื่อผสมกับของเหลวให้เกิดการไหลสองสถานะก่อนเข้าส่วนการทดสอบ
8. ตัวปรับอัตราการไหลของอากาศทำหน้าที่อัดปริมาณอากาศที่เข้าสู่ชุดทดลอง
9. ตัวควบคุมความดันเราจะติดตั้ง ก่อนที่สารทำงานจะไหลเข้าตัวปรับอัตราการไหลและ ถังเก็บน้ำเพื่อควบคุมระดับความดันในระบบ
10. เกจวัดความดัน ( Pressure gauge ) เราจะติดตั้ง เพื่อวัดความดันของอากาศก่อนที่จะไหลไปยังชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะความดันที่ออกจากวาล์วควบคุมความดันจะถูกแสดงค่าด้วยเกจวัดความดัน
11. ตัวกรองเราจะติดตั้ง ไว้หลังจากที่สารทำงานไหลเข้าตัวปรับอัตราการไหลถึงถังเก็บน้ำเพื่อกรองสิ่งสกปรกต่างๆออก
12. จอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิตอลใช้สำหรับวัดอุณหภูมิก่อนที่ของไหลจะไหลตัวปรับอัตราการไหลและ วัดอุณหภูมิที่ไหลออกจากตัวปรับอัตราการไหล
13. เครื่องชั่งตวงวัด 3 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของของเหลว หลังจากที่มีของไหลสองสถานะไหลผ่านส่วนการทดสอบออกสู่บรรยากาศ ซึ่งมีปริมาณน้อยมากดังนั้น มวลของของเหลวต่อหนึ่ง หน่วยเวลาจะถูกคำนวณเพื่อหาอัตราการไหลที่ไหลผ่านส่วนการทดสอบ
14. กล้องถ่ายรูป ในการถ่ายรูปแบบการไหลสองสถานะ ใช้กล้องจุลทรรศน์( Stereo Zoom Microscopes ) ซึ่งควรมีกำลังขยายไม่น้อยกว่า 60 เท่า ร่วมกับกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูง ซึ่งมีความเร็วของชัตเตอร์( Shutter speed ) ไม่น้อยกว่า 1/10,000 วินาที

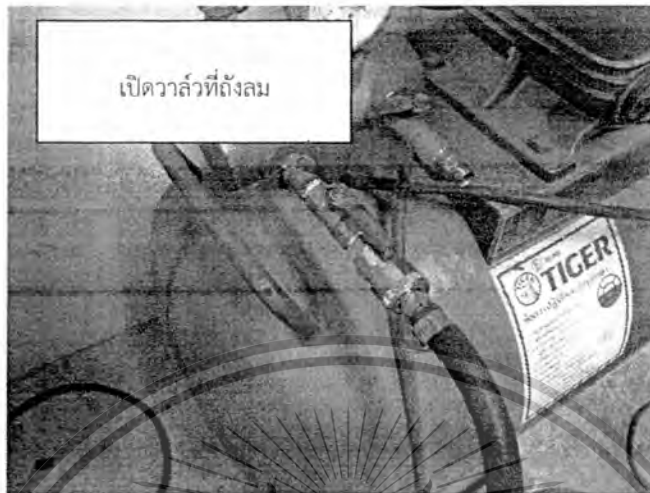
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

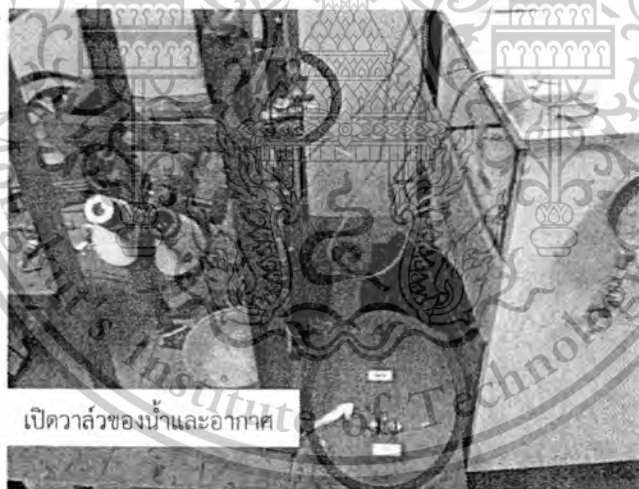
## 4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ชุดทดลองให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน จากนั้น เปิดวาล์วที่ถ่วงเพื่อให้อากาศไหลเข้าระบบ



รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 1

2. เปิดวาล์วของน้ำและอากาศที่ทางเข้าส่วนการทดสอบ



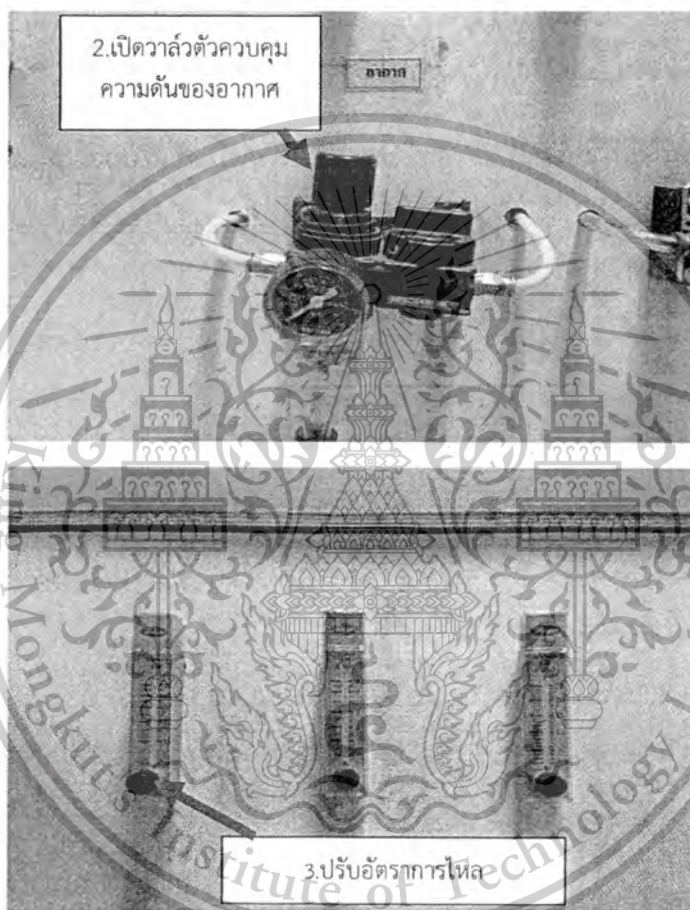
รูปที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 2

3. เปิดวาล์วแยกลมด้านของระบบอากาศไหลเข้า จากนั้นเปิดวาล์วตัวควบคุมความดันของอากาศ เพื่อให้อากาศไหลเข้าระบบ ต่อจากนั้นปรับอัตราการไหลที่ตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ ให้มีอากาศไหลในท่อเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



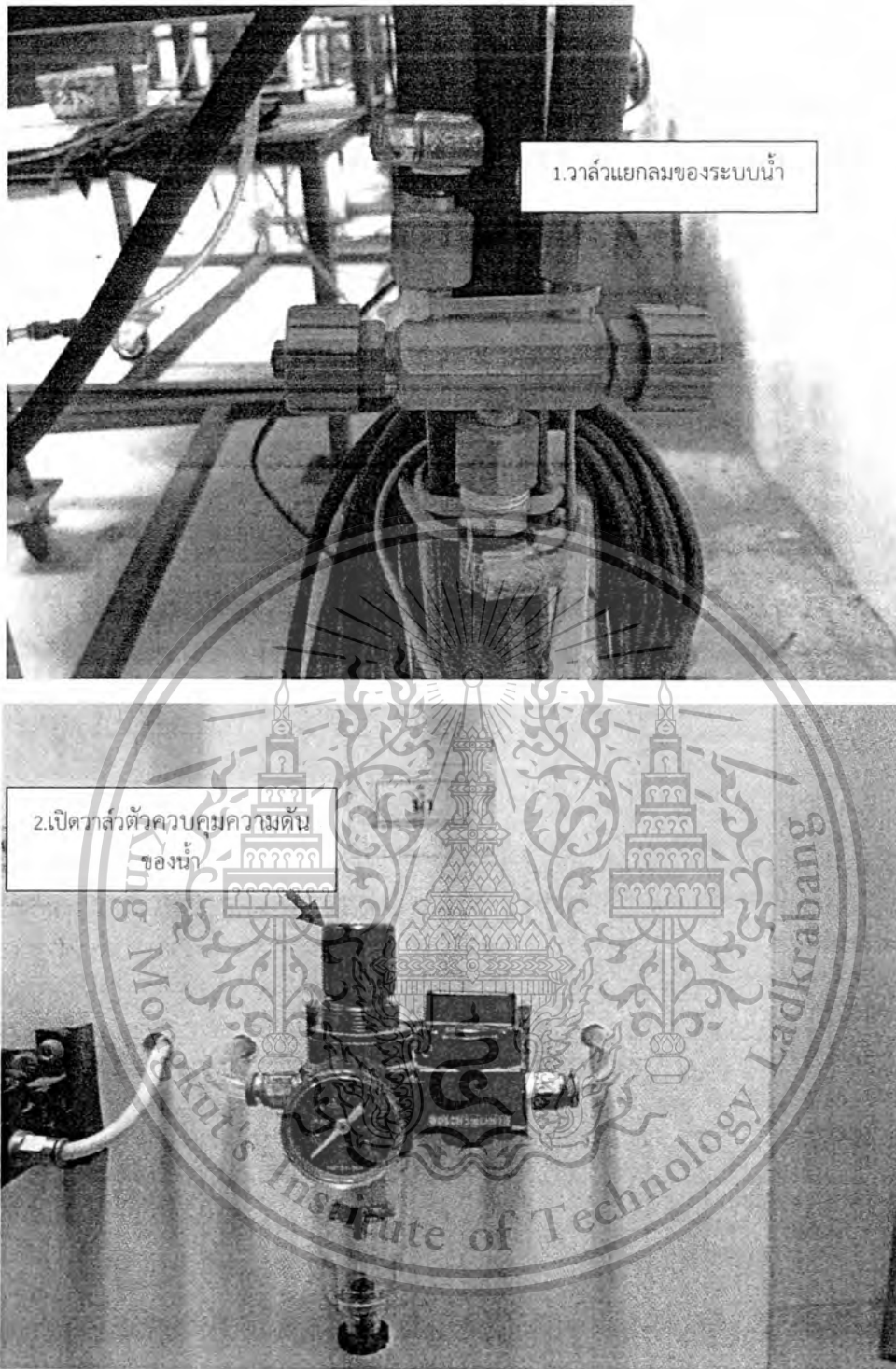
รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 3

4. เปิดวาล์วแยกด้านของระบบน้ำเพื่อให้อากาศไหลเข้าจากนั้นเปิดวาล์วตัวควบคุมความดันเล็กน้อยเพื่อให้อากาศไหลเข้าถึงเก็บน้ำไปดันให้น้ำถูกขับเข้าระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



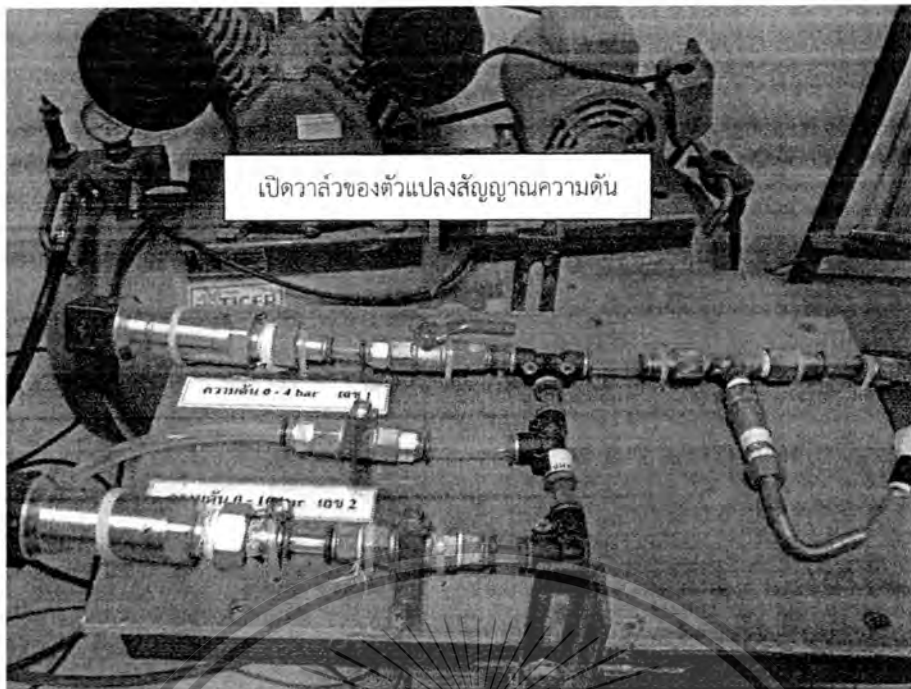
รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 4

5. เปิดวาล์วของตัวแปลงสัญญาณความดัน ขนาด 0 - 4 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



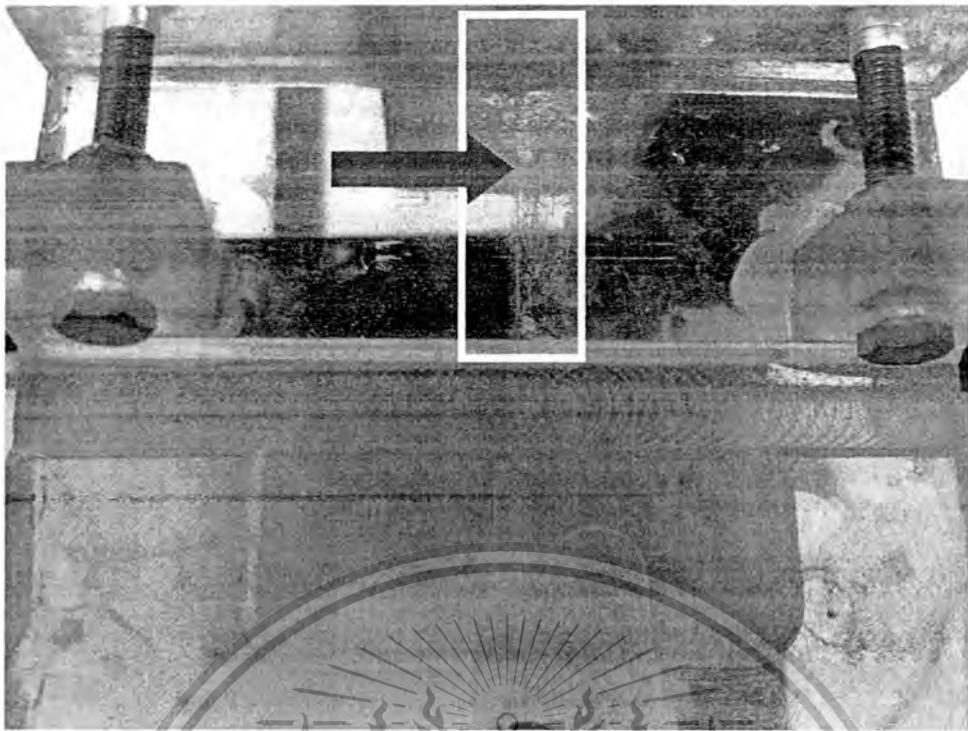
รูปที่ 4.6 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 5

6. ทำการปรับอัตราการไหลของน้ำโดยให้อัตราการไหลคงที่ตัวแปลงสัญญาณความดันของระบบน้ำ และปรับอัตราการไหลของอากาศให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆที่ตัวปรับอัตราการไหล
7. ปลอ่ยให้ระบบทำงานจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ และทำการถ่ายภาพ จำนวน 50 ภาพและวิดีโอ 10 วินาที ในหนึ่งเงื่อนไข สังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจากภาพถ่ายและบันทึกผลที่อัตราการไหลของอากาศที่ค่าต่างๆ
8. ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 2 และ 3 ที่อัตราการไหลของน้ำที่ค่าต่างๆ
9. นำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นแผนภูมิรูปแบบการไหล (Flow Pattern map) โดยแสดงค่าระหว่างความเร็วของน้ำ (Liquid Superficial Velocity) และความเร็วของอากาศ (Gas Superficial Velocity)

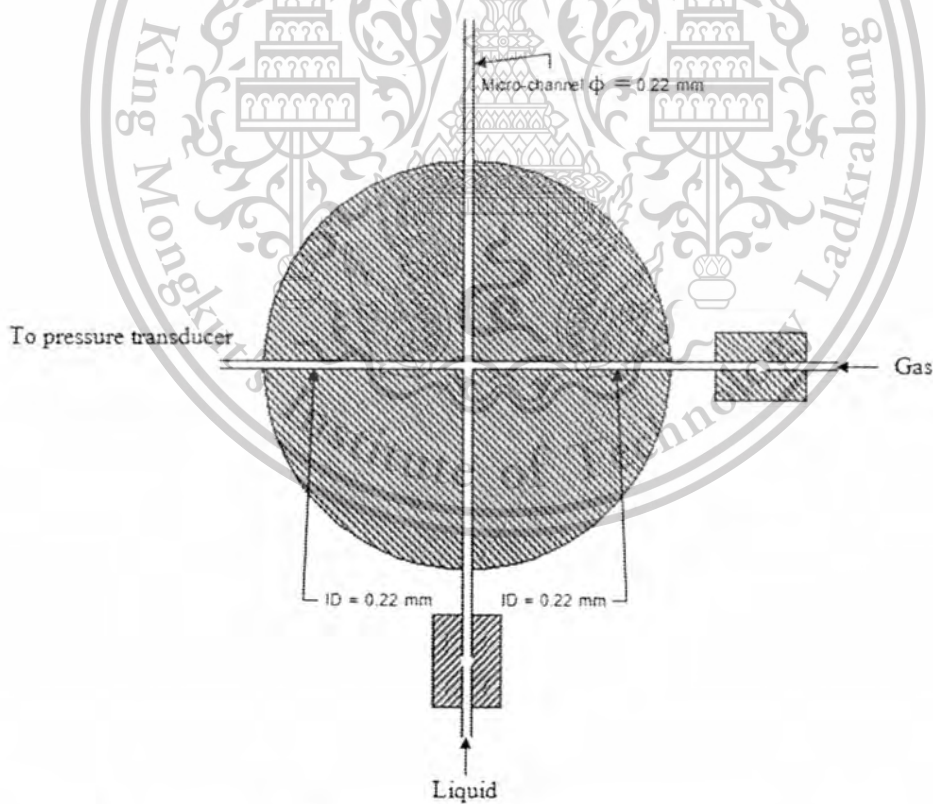
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.7 แสดงส่วนการทดสอบ

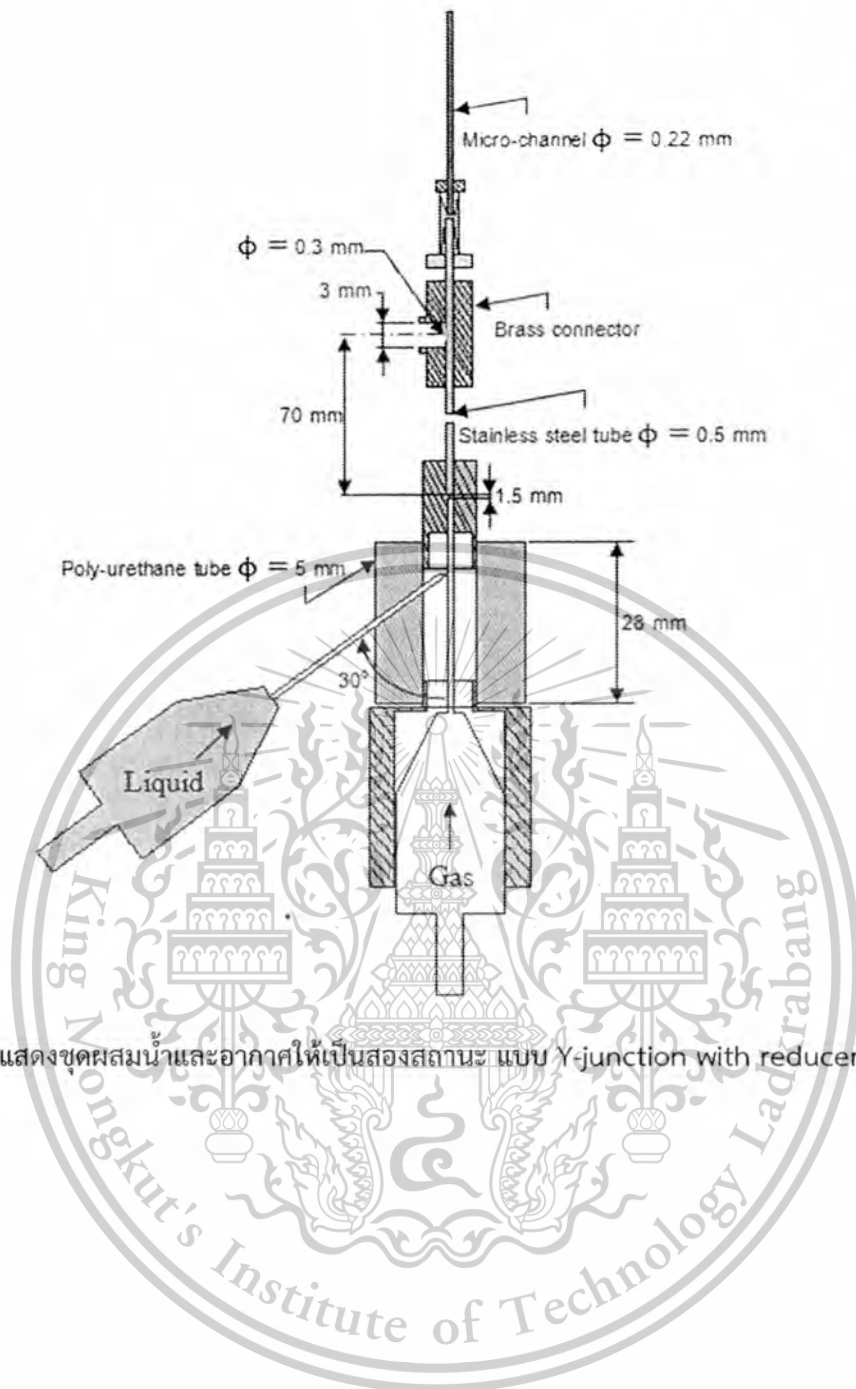


รูปที่ 4.8 แสดงชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะ แบบ Cross-junction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and create a derivative work when use.

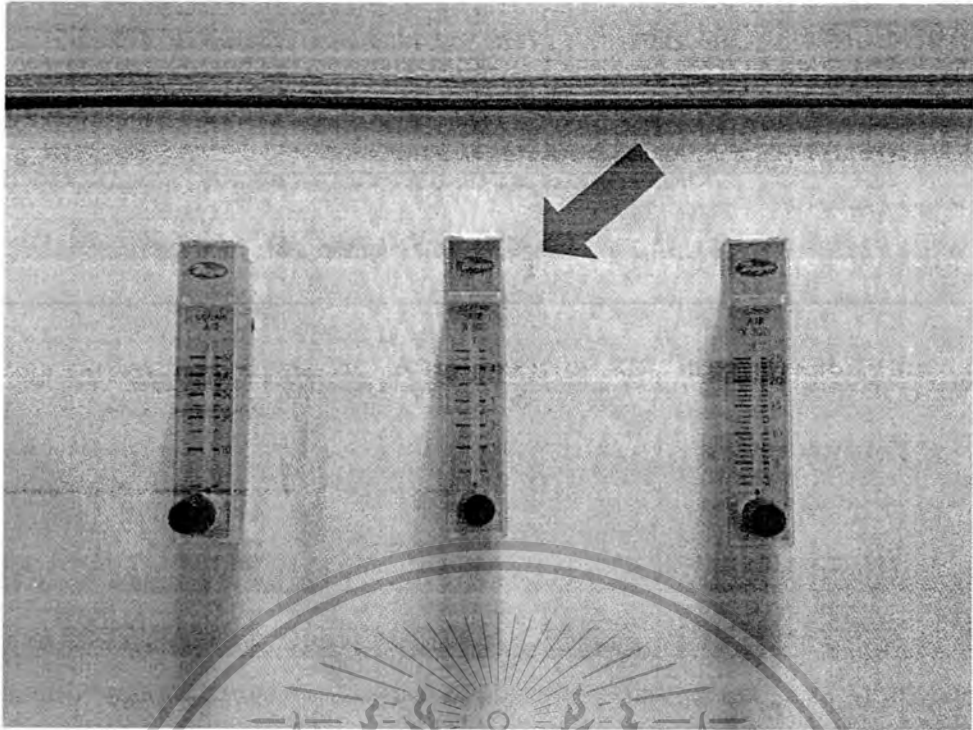


รูป 4.9 แสดงชุดผสมน้ำและอากาศให้เป็นสองสถานะ แบบ Y-junction with reducer inlet

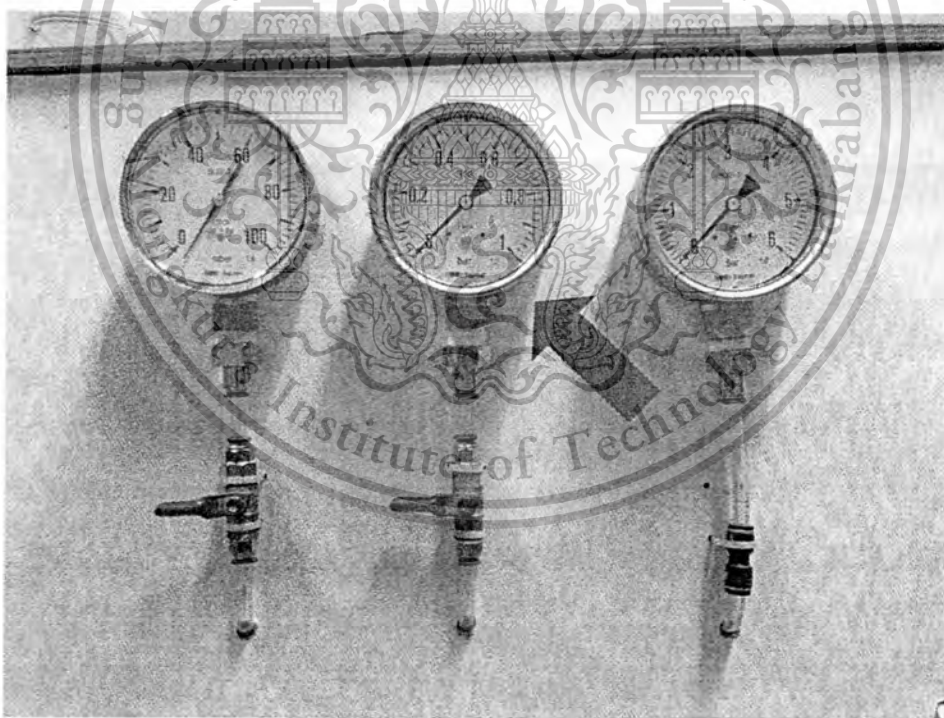
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.10 แสดงตัวปรับอัตราการไหลของอากาศ



รูปที่ 4.11 แสดงเกจวัดความดัน

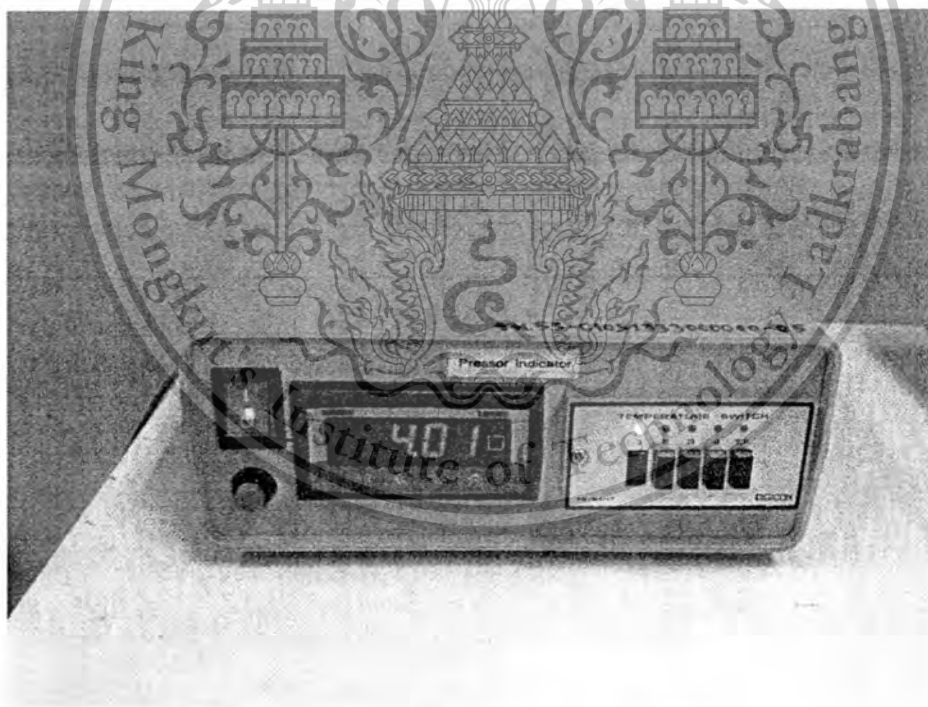
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 แสดงจอแสดงผลอุณหภูมิแบบดิจิทัล

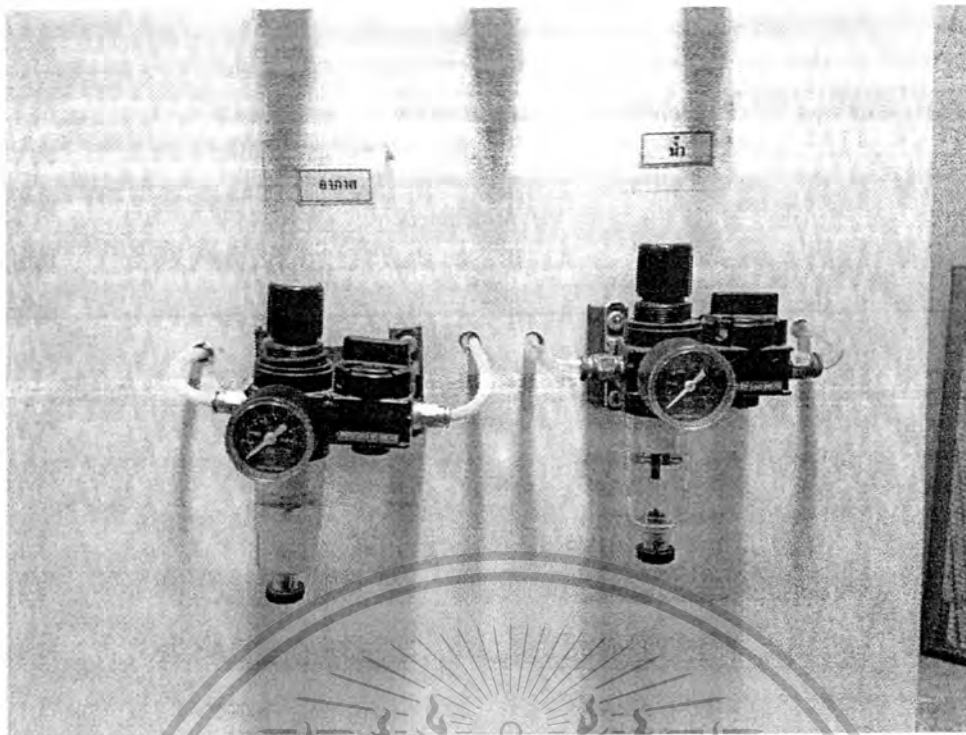


รูปที่ 4.13 แสดงตัวแปลงสัญญาณความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 แสดงตัวควบคุมความดัน

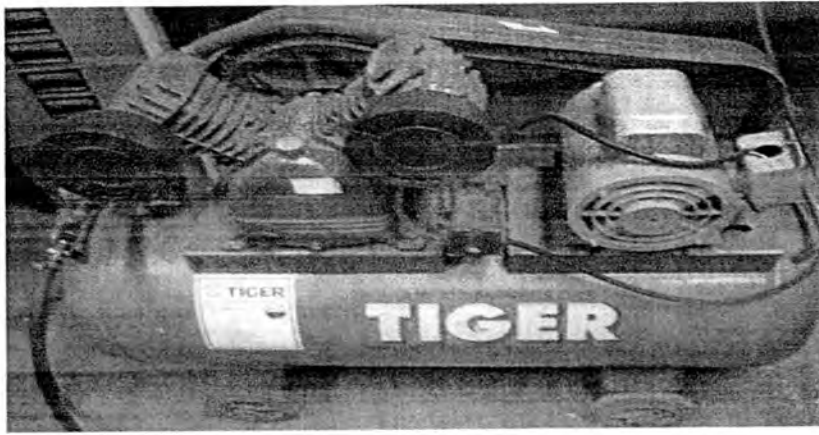


รูปที่ 4.15 แสดงถังเก็บน้ำ

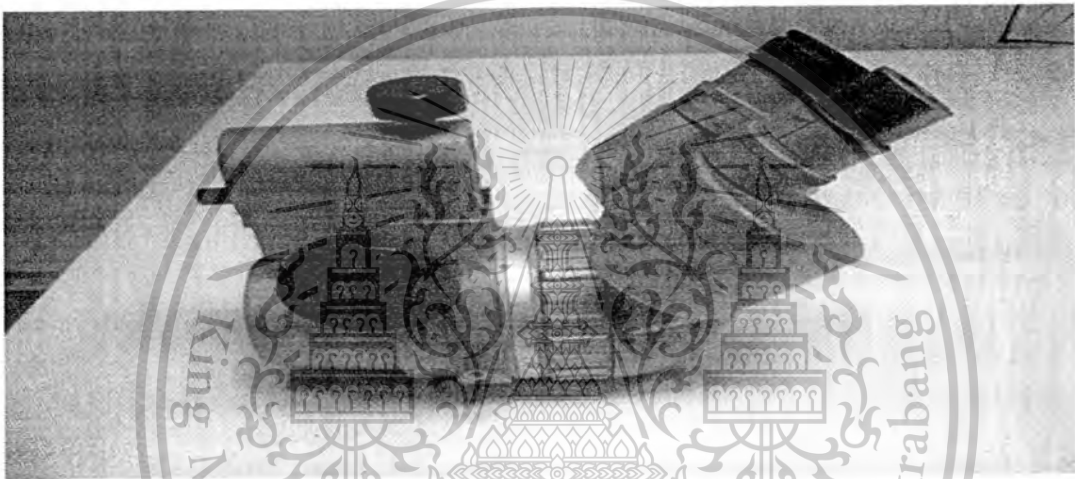
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.16 แสดงป้มลม



รูปที่ 4.17 แสดงกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 4.18 แสดงเครื่องชั่งตณนิยม 3 ตำแหน่ง (Electronic Balance)

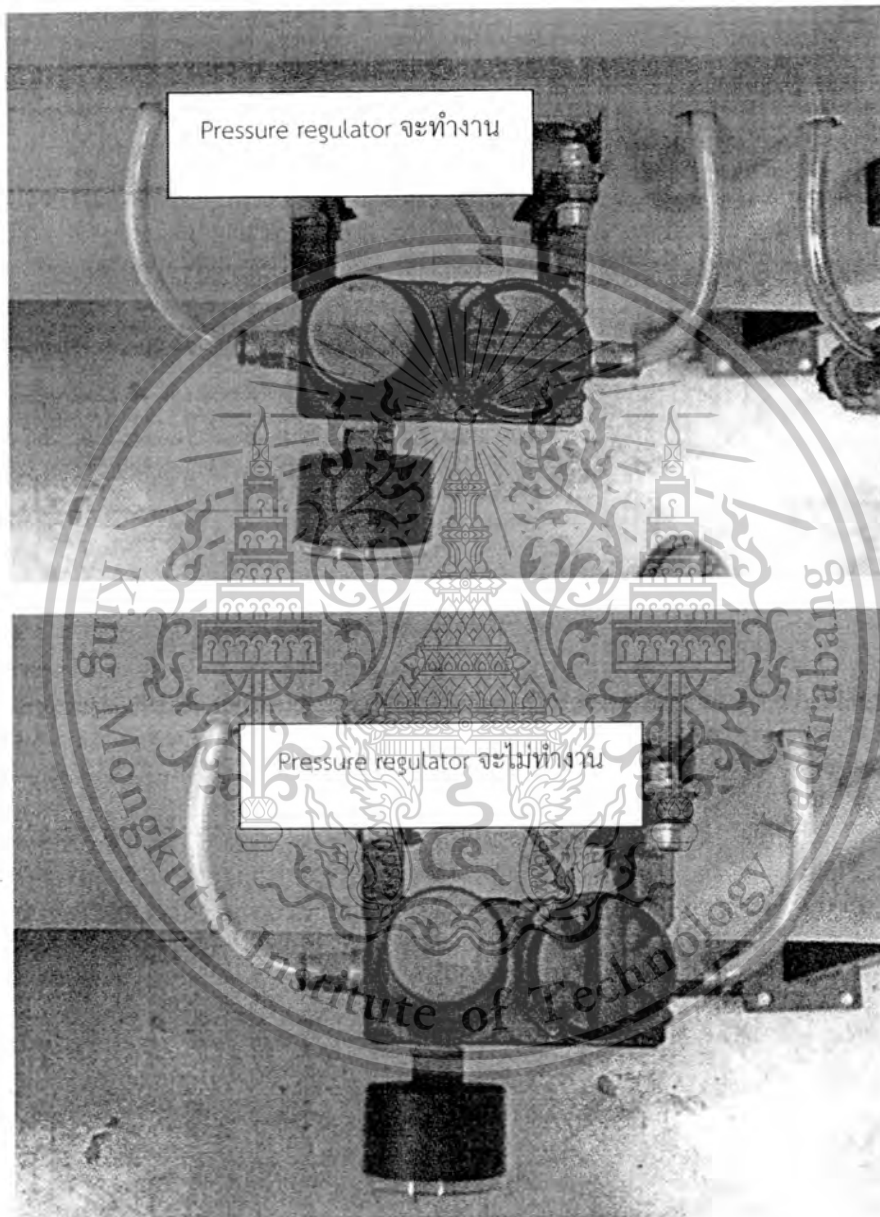
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.3 ข้อควรระวังในการทดลอง

1. ก่อนการทดลองควรเช็ควาระบบต่าง ๆ พร้อมทั้งจะใช้งานหรือไม่
2. ความดันกันในระบบไม่ควรเกิน 4 บาร์ เพราะอาจทำให้ระบบเกิดการเสียหายได้
3. ควรตรวจเช็คตัวควบคุมความดันว่าพร้อมใช้งานหรือไม่



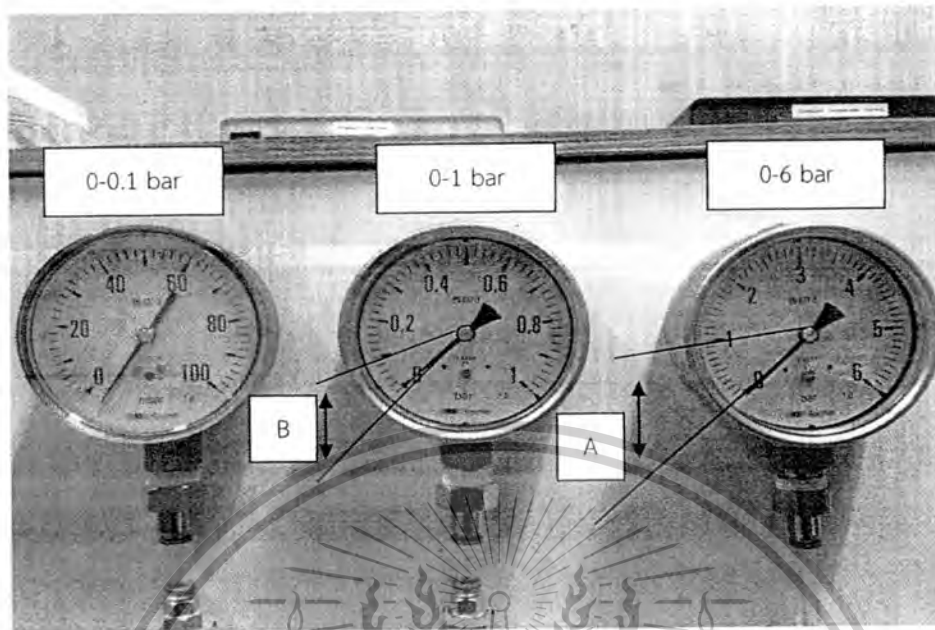
รูปที่ 4.19 แสดงการใช้งานตัวควบคุมความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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



รูปที่ 4.20 แสดงช่วงความดันที่เกจแต่ละตัววัดได้

จากรูป ในช่วง A สามารถเปิดเกจขนาด 0 - 1 บาร์ได้แต่ไม่สามารถเปิดเกจขนาด 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

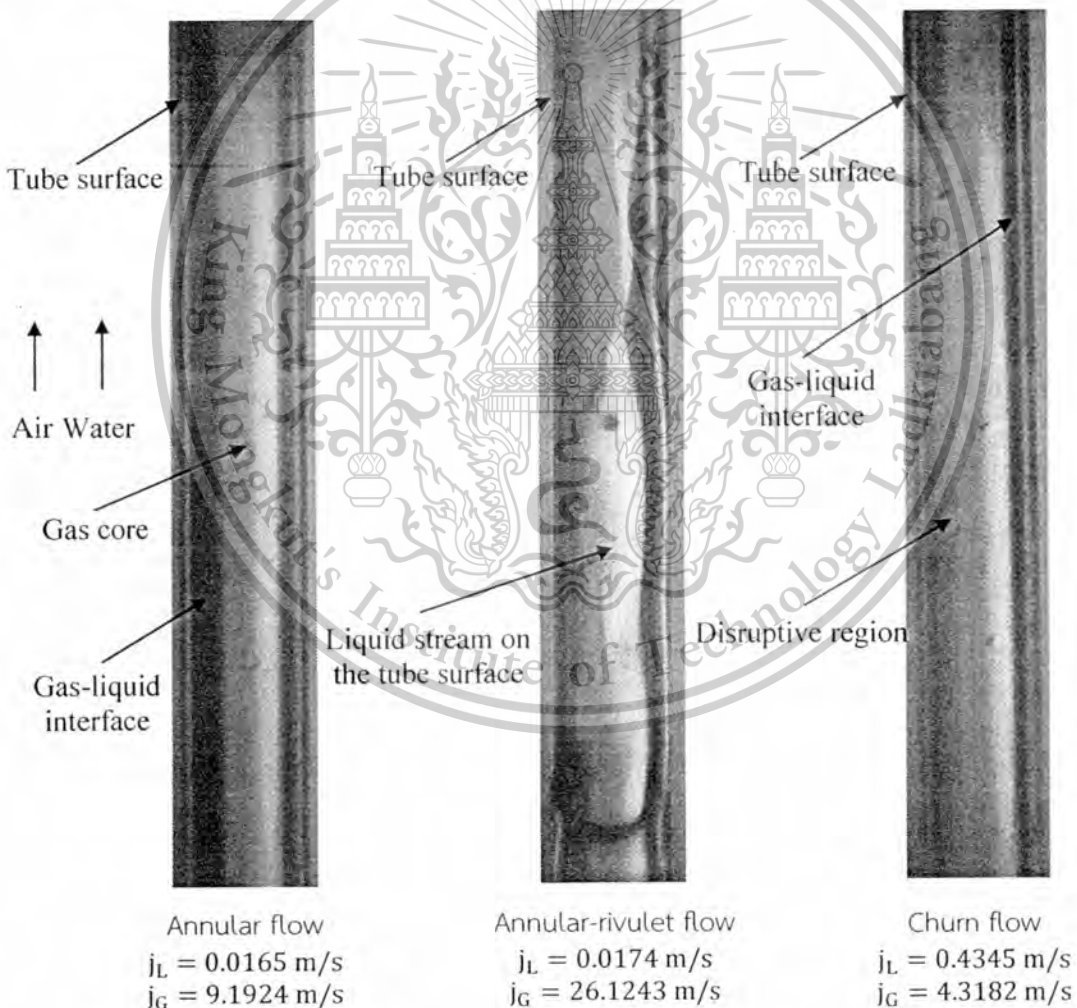
### ผลการทดลอง

เนื่องจากตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษารูปแบบการไหลของการไหลสองสถานะ, ความดันลด และ Two-phase frictional multiplier

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการเปิดวาล์วของน้ำและอากาศ โดยปรับให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ และปรับอัตราการไหลของอากาศจากค่าต่ำไปค่าสูงจากนั้นสังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น แล้วทำการบันทึกผลจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหล

#### 5.1 รูปแบบการไหลที่ได้จากการทดลอง

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Cross-junction



รูปที่ 5.1 รูปแบบการไหลในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 mm : Cross-junction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

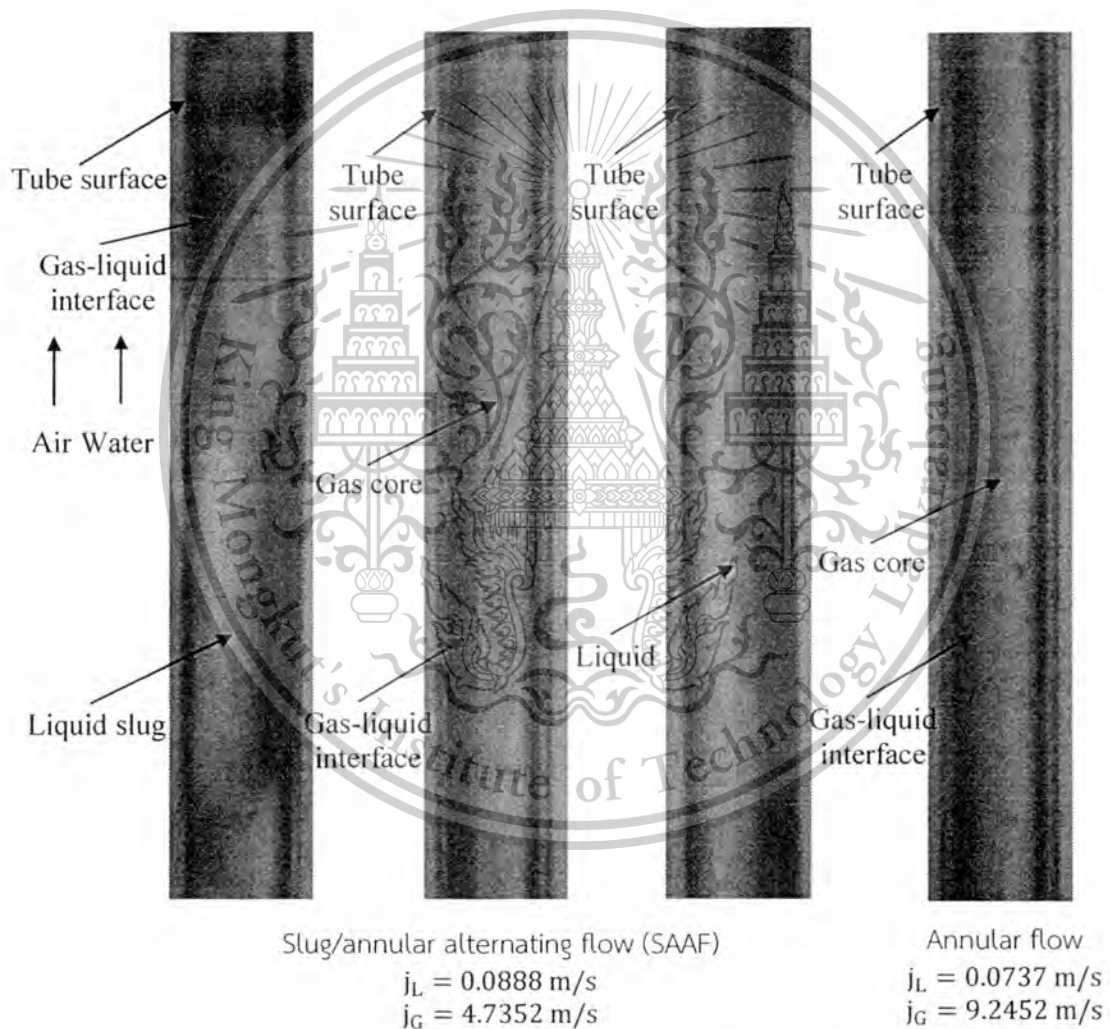
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Cross-junction พบ 3 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำจะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ
2. Annular-rivulet flow : เป็นที่สังเกต annular flow จะสลับกับการไหลของสายน้ำเหมือนแม่น้ำบนพื้นผิวท่อ
3. Churn flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูงเพียงพอที่จะนำไปสู่ลักษณะของการไหลปั่นป่วน

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

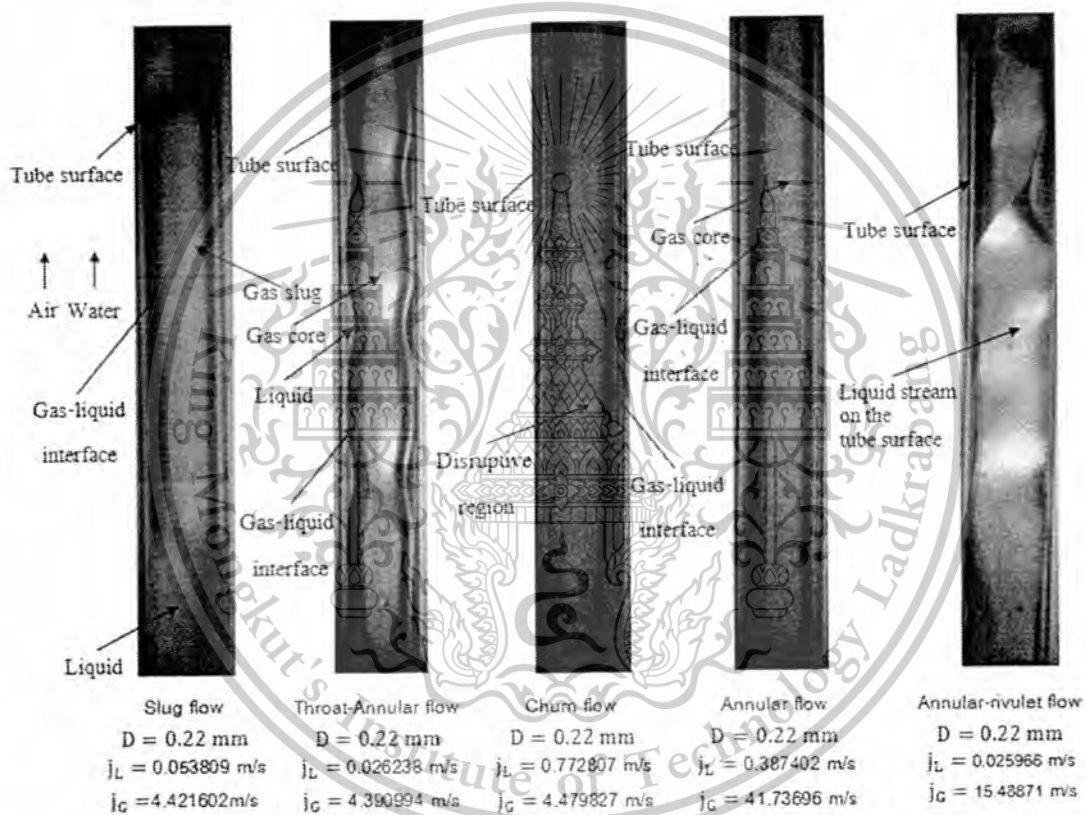
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ 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

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Cross-junction



รูปที่ 5.3 รูปแบบการไหลในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 mm : Cross-junction

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Cross-junction พบ 5 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Slug flow : ซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศค่อนข้างต่ำ มีลักษณะฟองยาวที่ไหลไปในทิศทางตามแนวแกน
2. Throat-annular flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวต่ำ การเกิดตัวของรูปแบบ throat-annular flow พัฒนาจากรูปแบบการไหล slug flow มาจนกันจนเกิดเป็นคอคอด

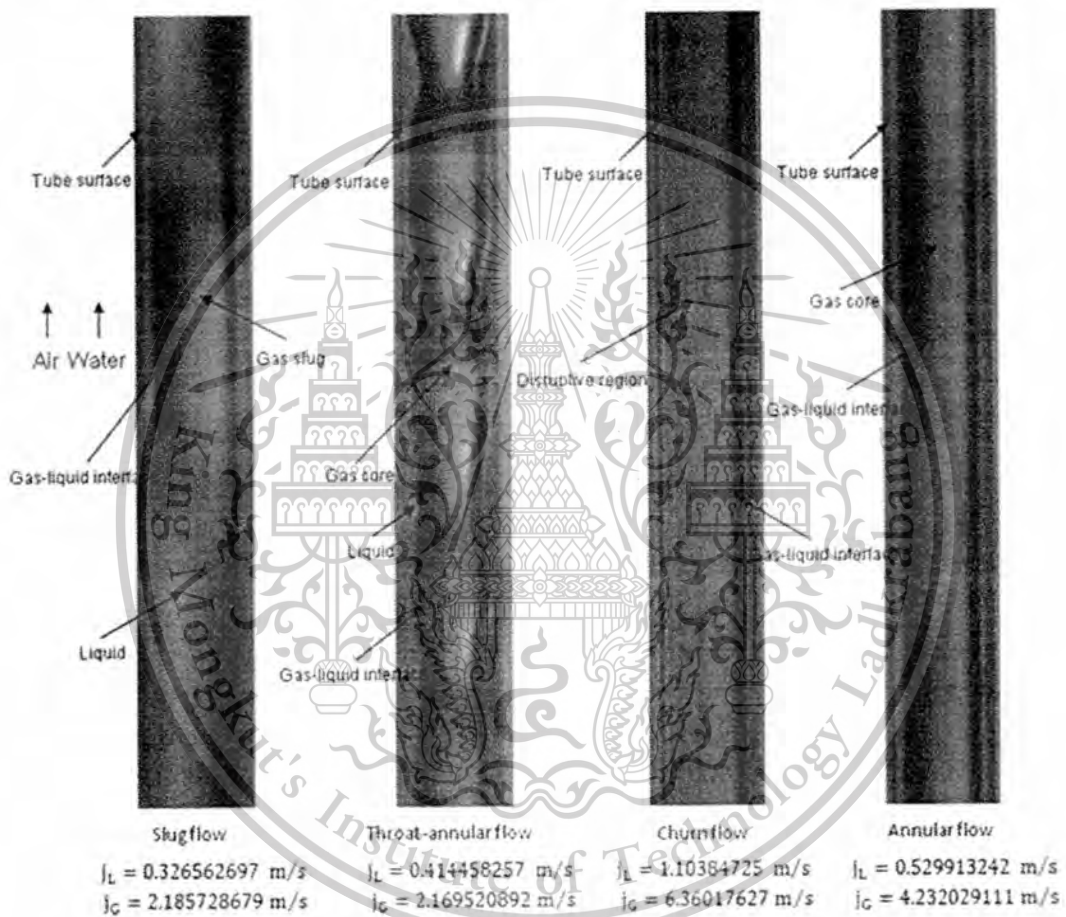
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. Churn flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูงเพียงพอที่จะนำไปสู่ลักษณะของการไหลปั่นป่วน
4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนั้นจะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ
5. Annular-rivulet flow : เป็นที่สังเกต annular flow จะสลับกับการไหลของสายน้ำเหมือนแม่น้ำบนพื้นผิวท่อ

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet



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

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบ 4 รูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Slug flow : ซึ่งเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศค่อนข้างต่ำ มีลักษณะฟองยาวที่ไหลไปในทิศทางตามแนวแกน

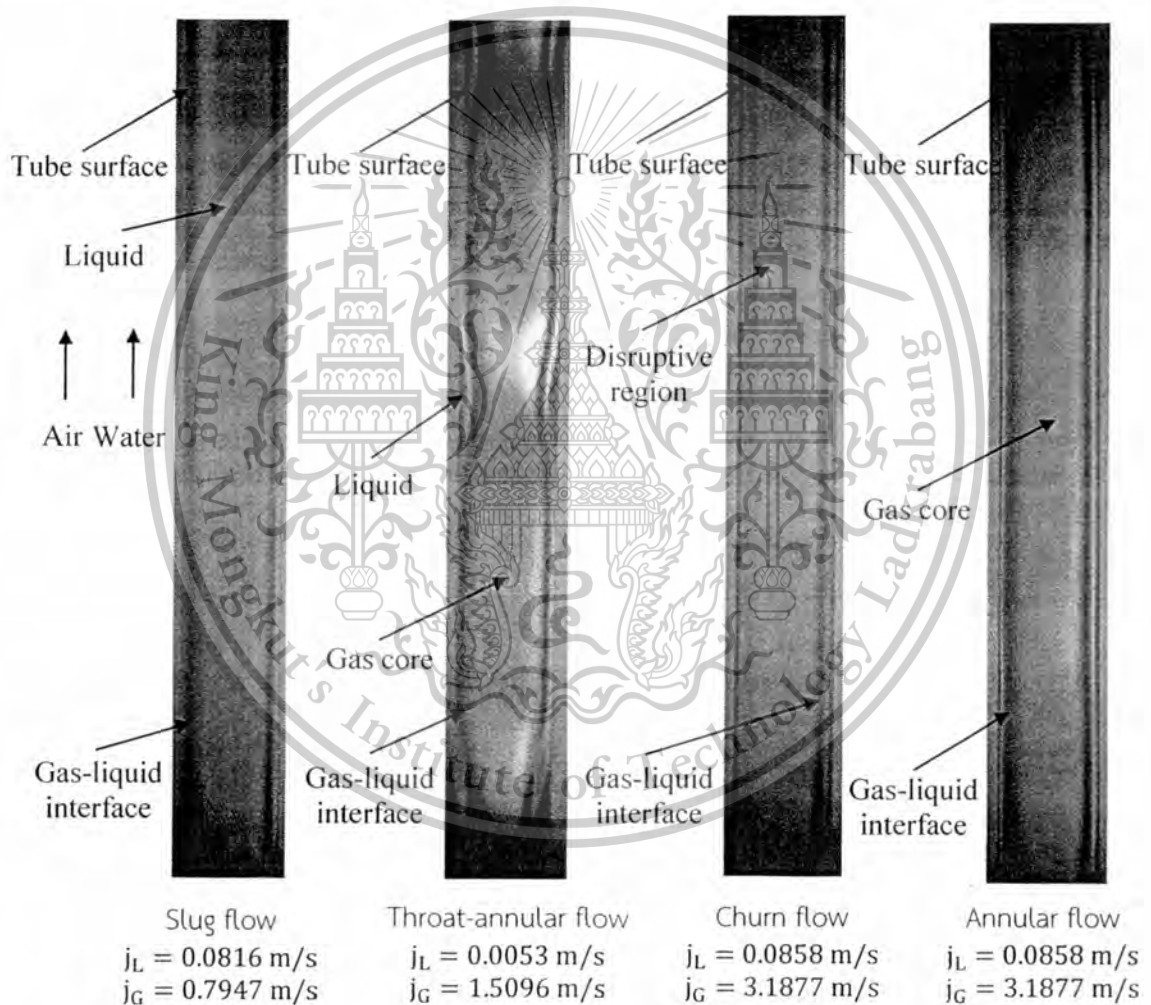
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. Throat-annular flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวต่ำ การเกิดตัวของรูปแบบ throat-annular flow พัฒนาจากรูปแบบการไหล slug flow มาจนกันจนเกิดเป็นคอคอด
3. Churn flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูงเพียงพอที่จะนำไปสู่ลักษณะของการไหลปั่นป่วน
4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Cross-junction



รูปที่ 5.5 รูปแบบการไหลในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 mm : Cross-junction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

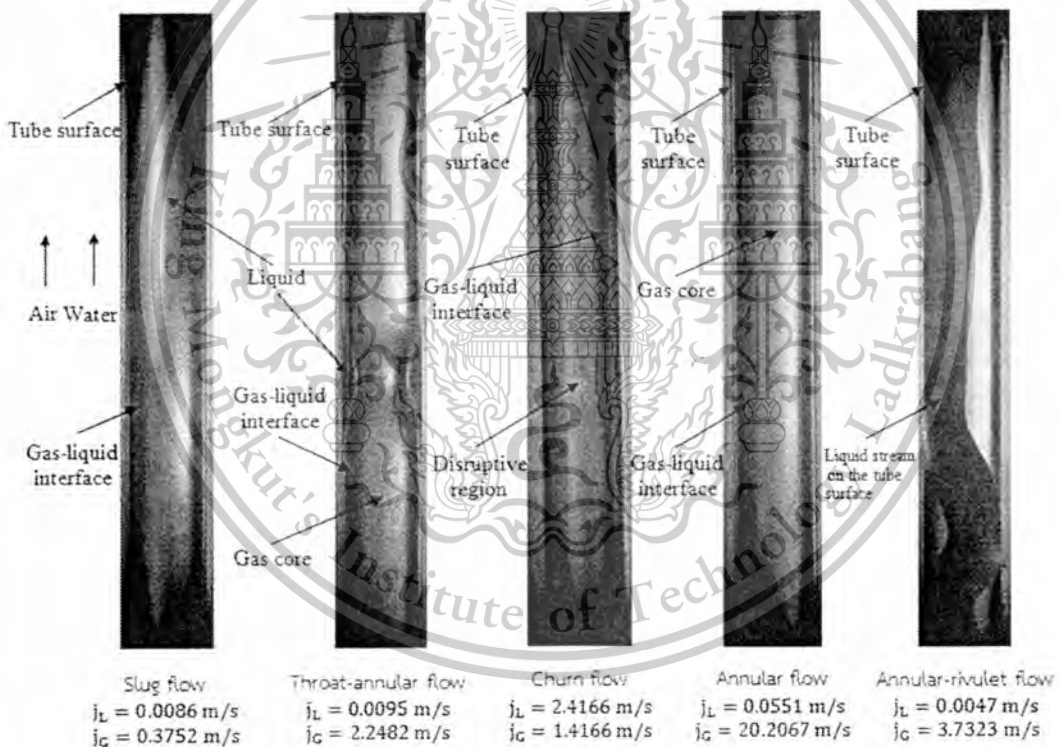
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Cross-junction 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 : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูงเพียงพอที่จะนำไปสู่ลักษณะของการไหลปั่นป่วน
4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปแบบการไหลของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร โดยใช้ Mixing chamber แบบ 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 มาชนกันจนเกิดเป็นคอคอด
3. Churn flow : พบในภูมิภาคของอัตราการไหลของของเหลวและอากาศสูงเพียงพอที่จะนำไปสู่ลักษณะของการไหลปั่นป่วน
4. Annular flow : เป็นการไหลที่มีอากาศตามแนวแกนท่อและมีน้ำมีลักษณะเป็นฟิล์มอยู่รอบผนังของท่อซึ่งฟิล์มน้ำจะมีลักษณะเป็นลอนตลอดแนวท่อ
5. Annular-rivulet flow : เป็นที่สังเกต annular flow จะสลับกับการไหลของสายน้ำเหมือนแม่น้ำบนพื้นผิวท่อ



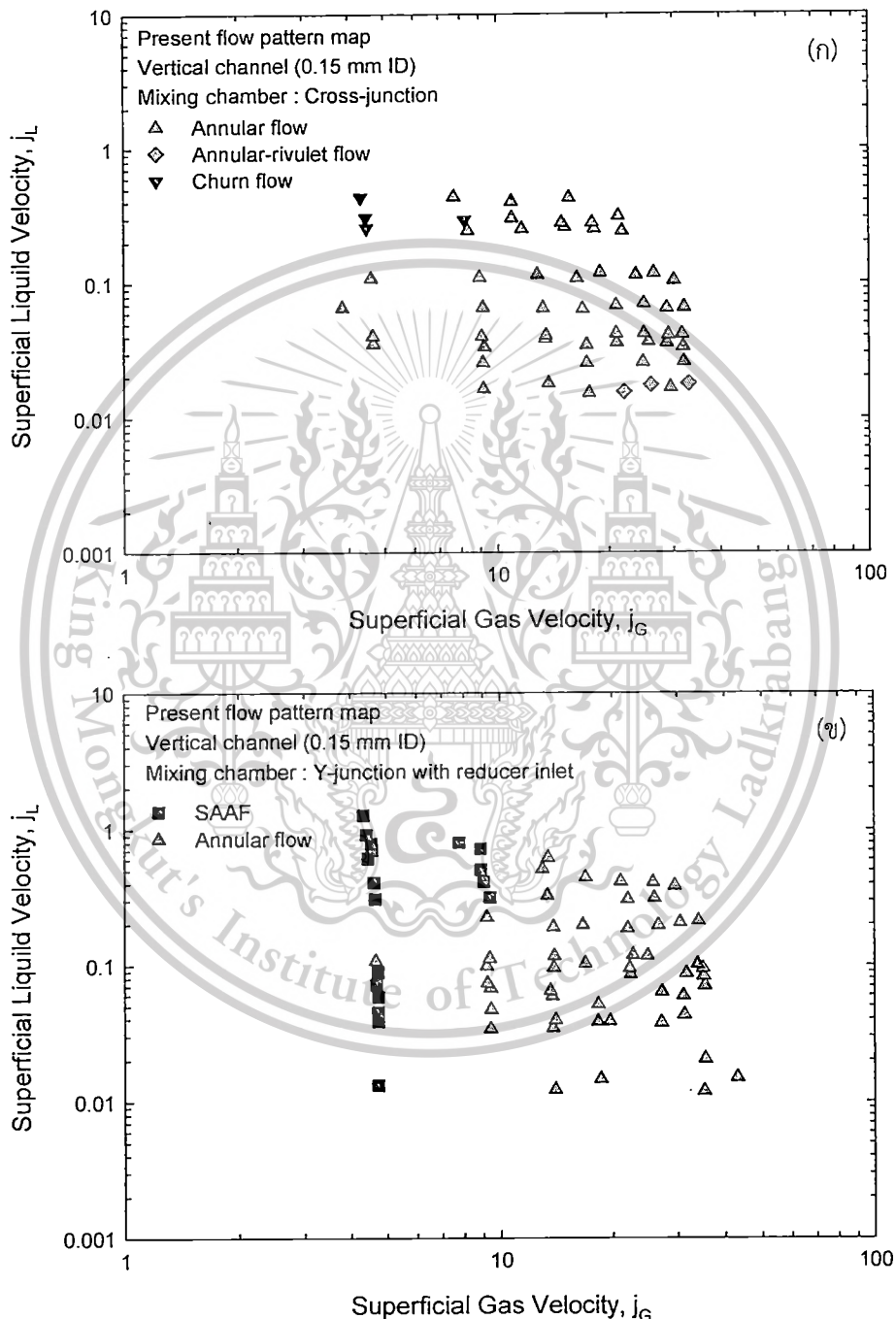
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.2 แผนภูมิรูปแบบการไหล (Flow Pattern Map)

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

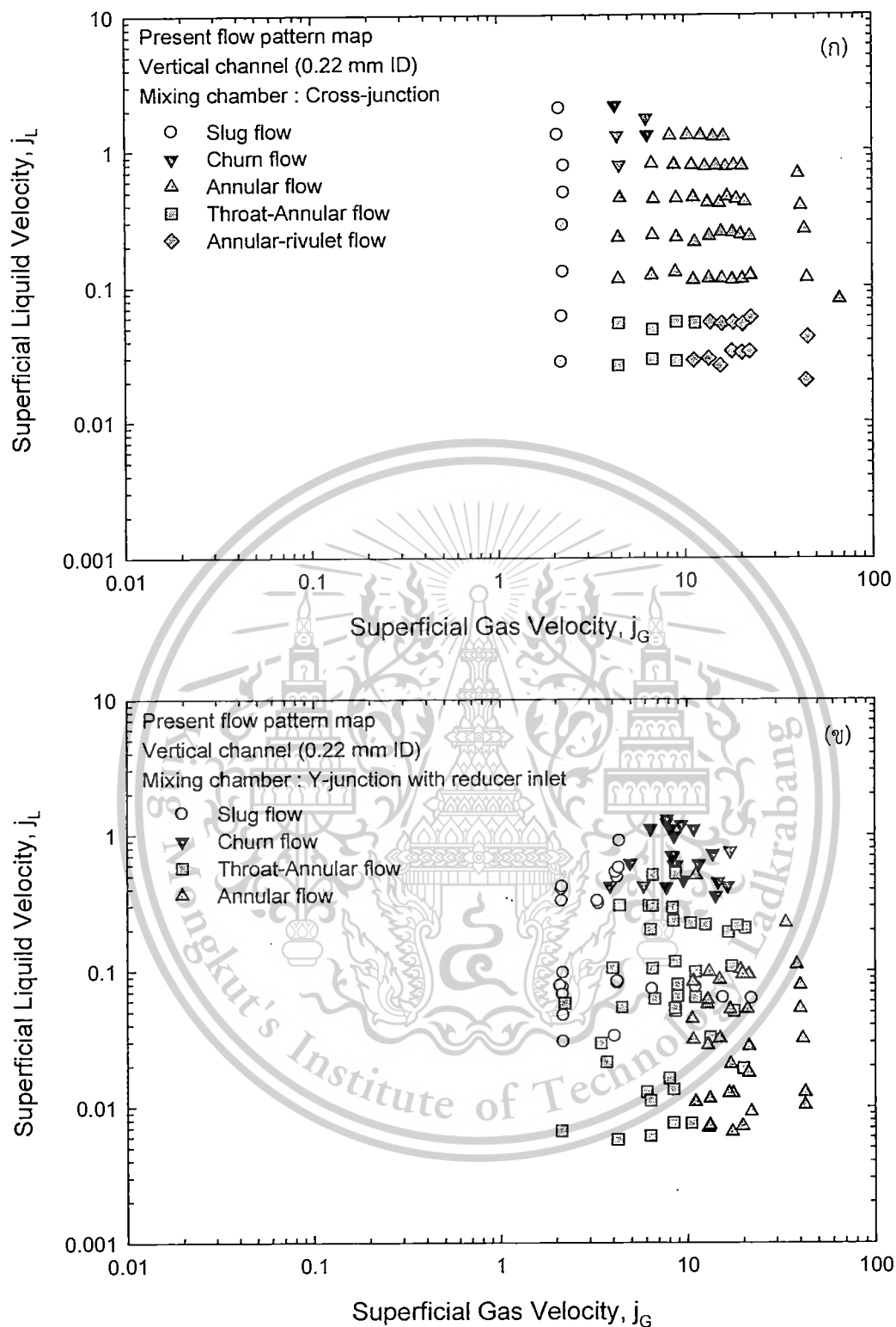


รูปที่ 5.7 แผนภูมิรูปแบบการไหลของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction และ (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

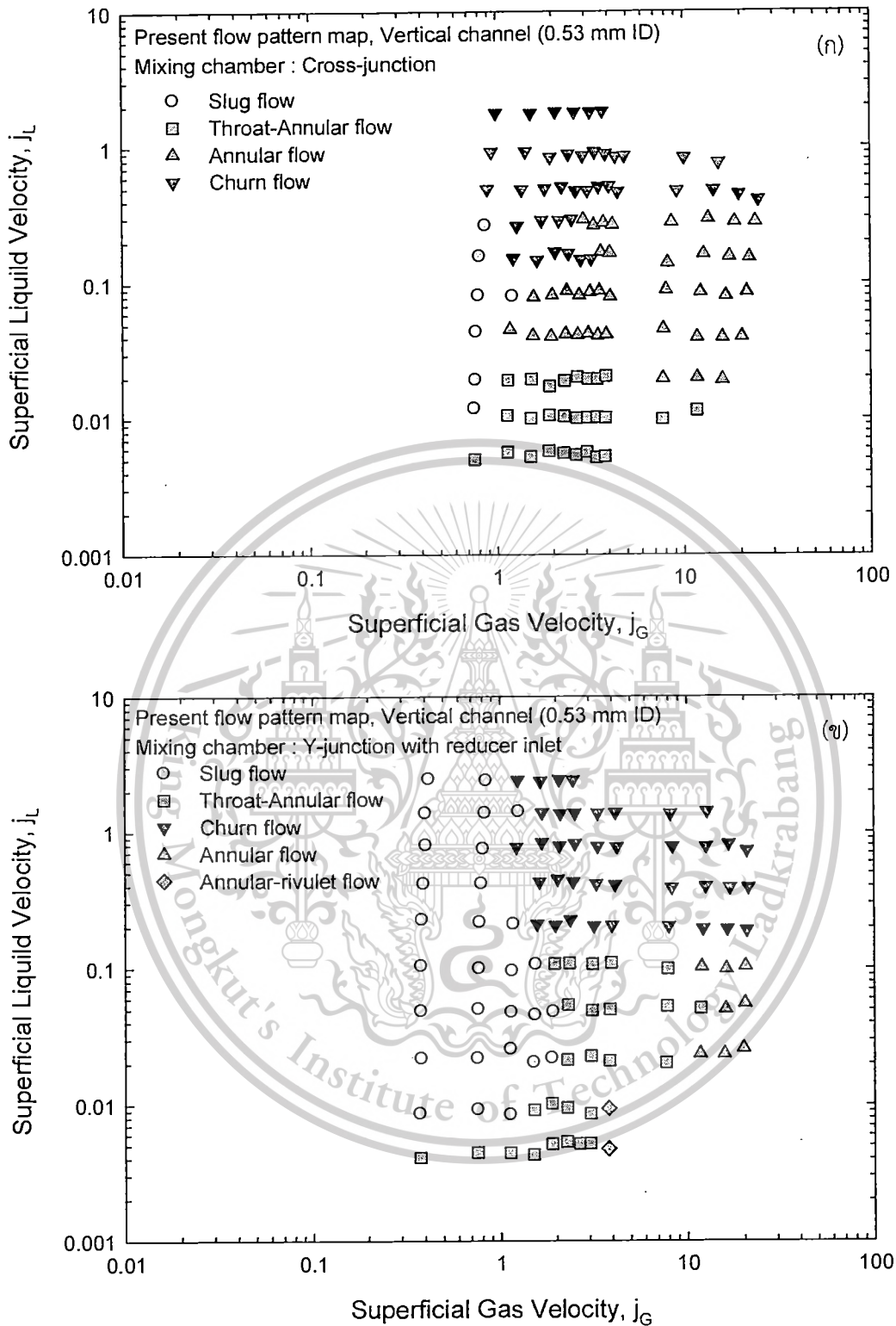


รูปที่ 5.8 แผนภูมิรูปแบบการไหลของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction และ (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

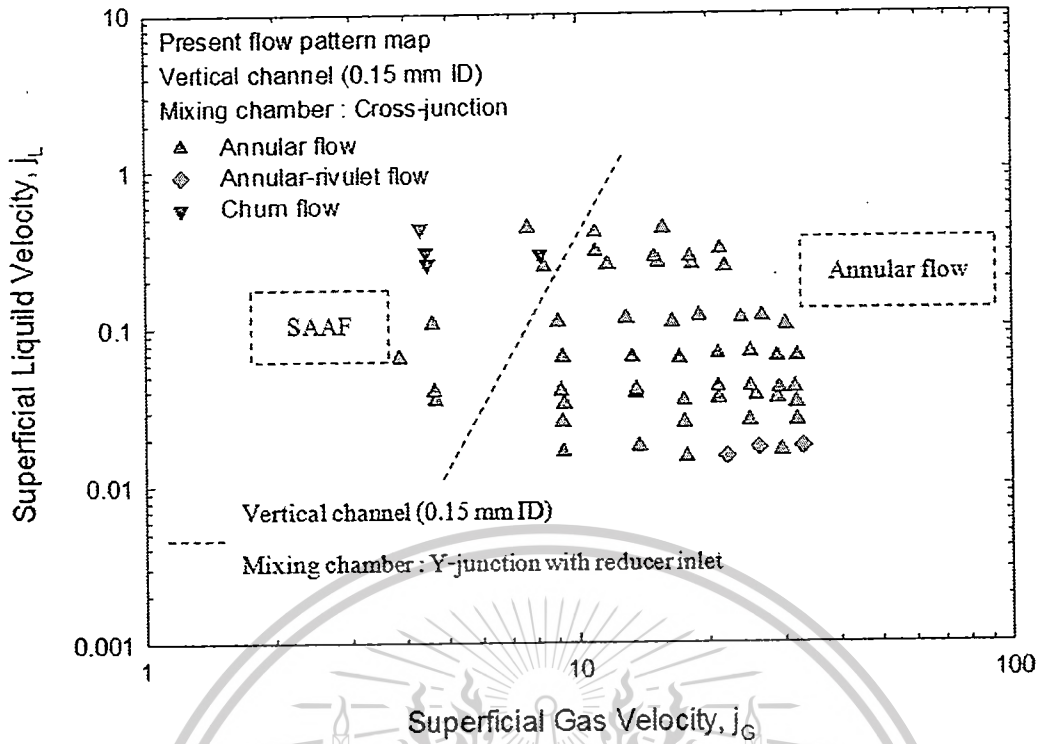


รูปที่ 5.9 แผนภูมิรูปแบบการไหลของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction และ (ข) Y-junction with reducer inlet

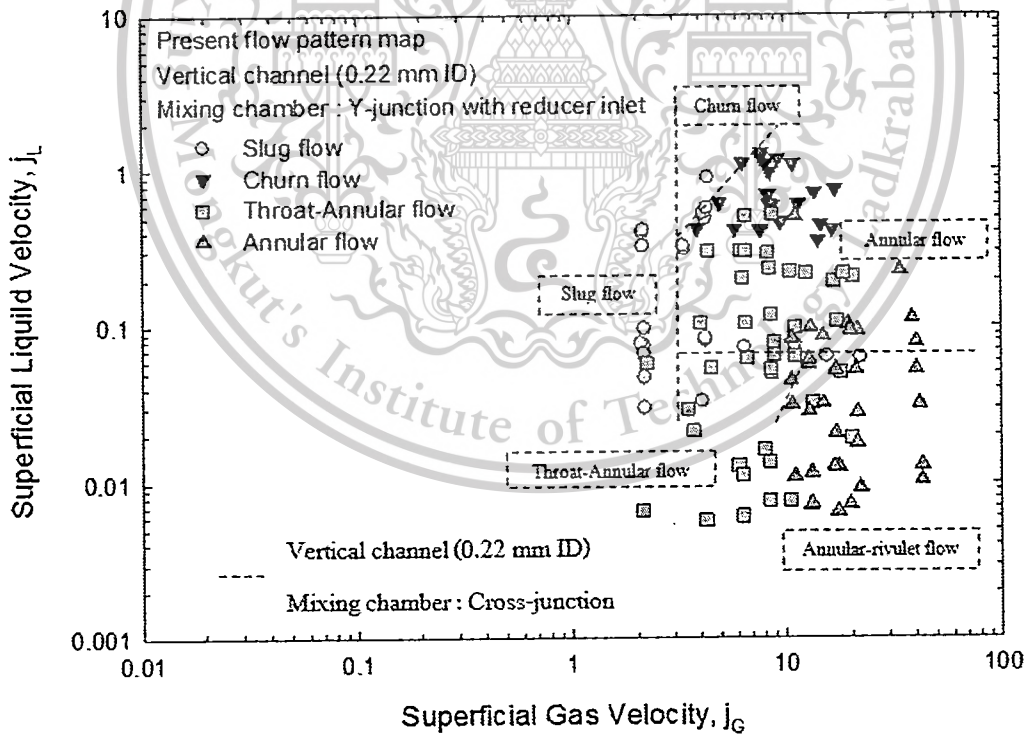
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล ของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 mm ยาว 104 มิลลิเมตร

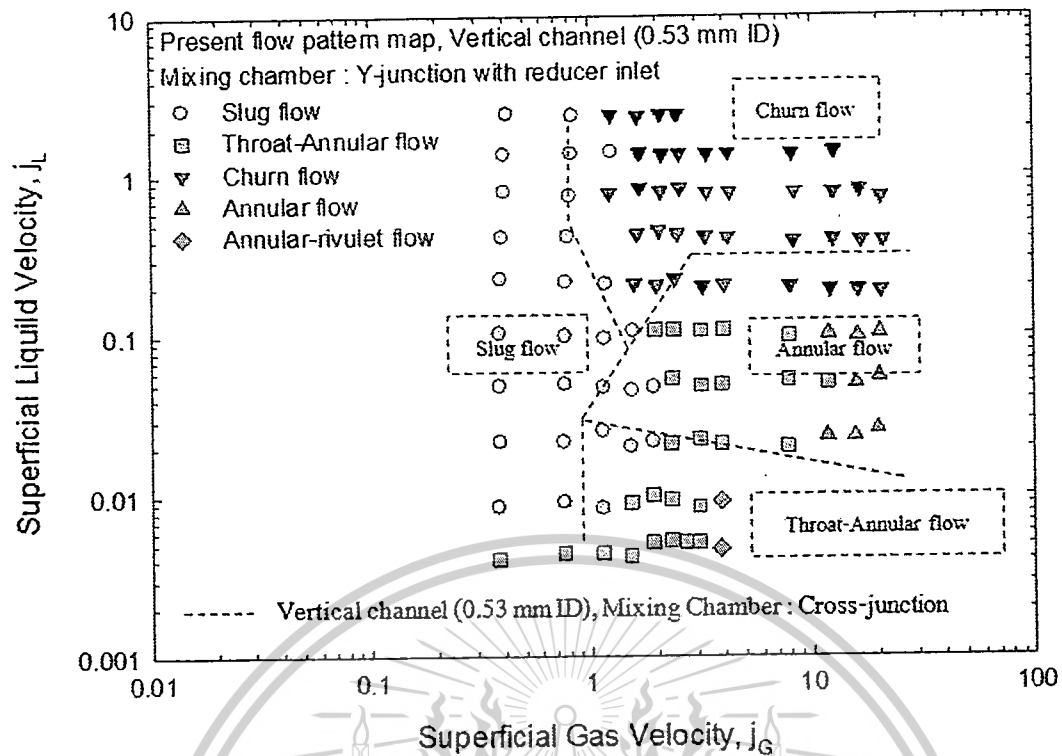


รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล ของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 mm ยาว 120 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



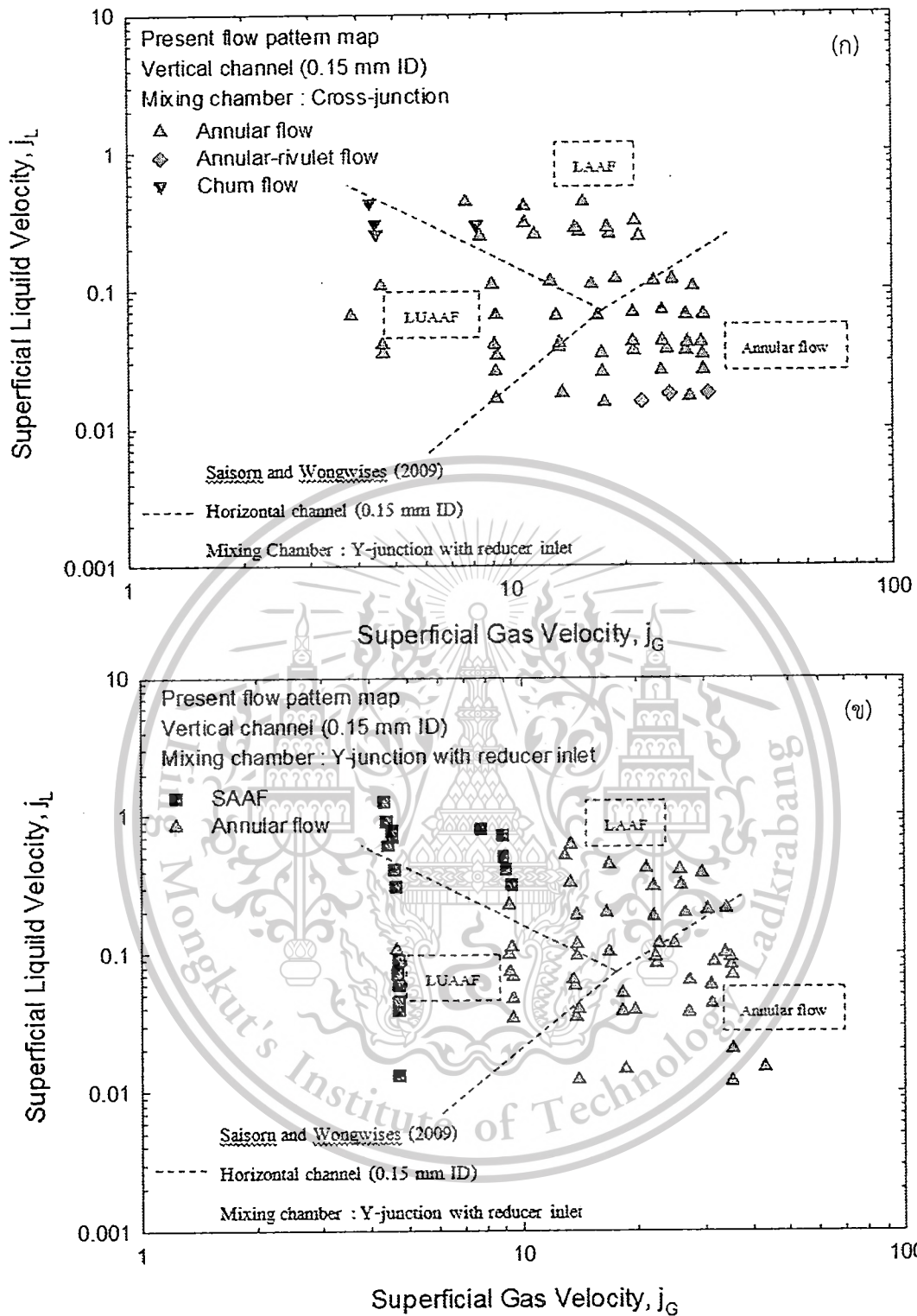
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหล ของท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายใน 0.53 mm ยาว 320 มิลลิเมตร

ในรูปที่ 5.7-5.12 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองงานปัจจุบันของ mixing chamber ทั้ง 2 ชนิด ระหว่าง Cross-junction (รูปที่ 4.8) และ Y-junction with reducer inlet (รูปที่ 4.9) พบว่า รูปแบบการไหลที่ได้รับมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลเนื่องมาจากความไม่เสถียรบริเวณมุม cross-junction ตามที่กล่าวโดย Kawaji และ คณะ (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

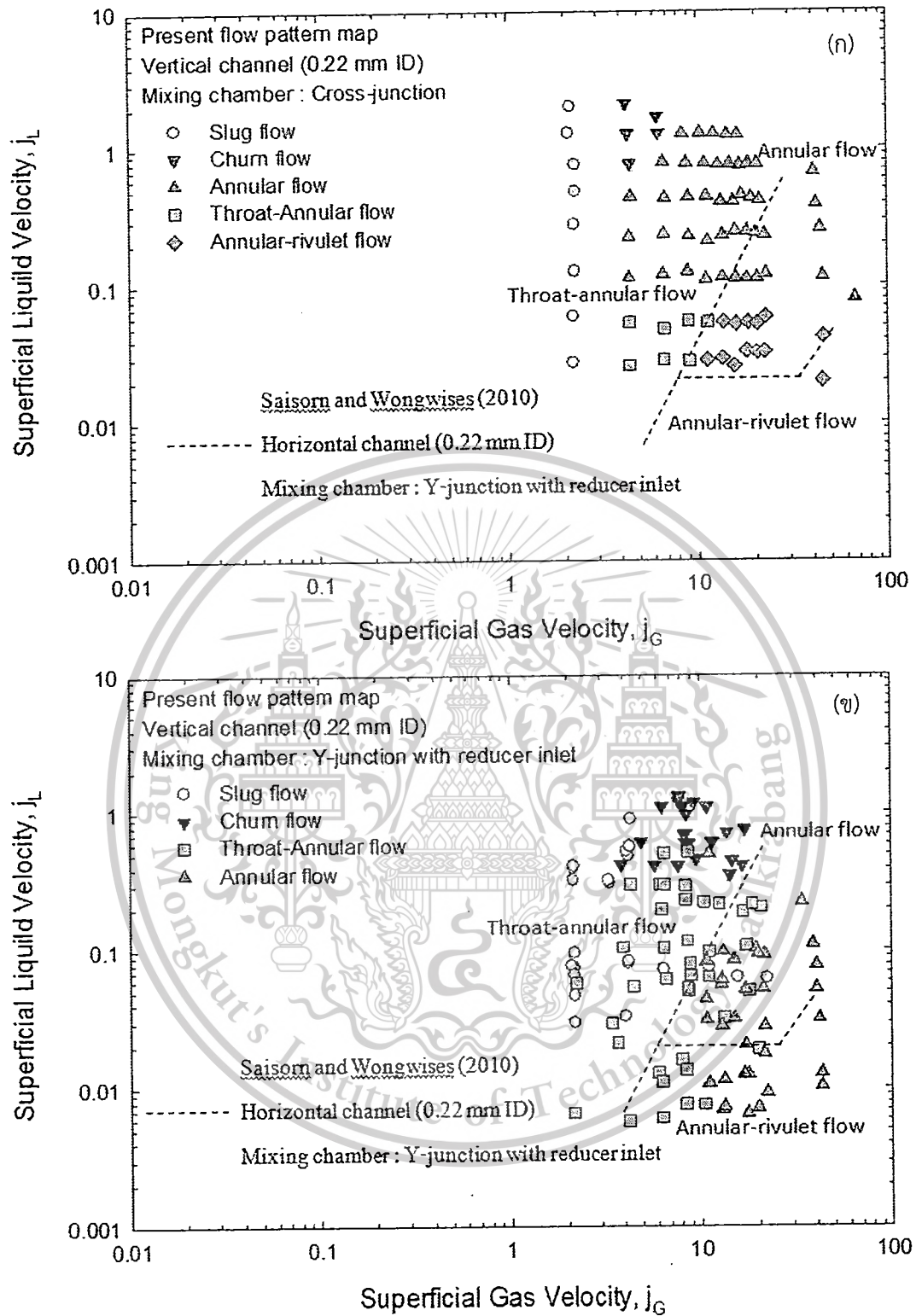


รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Saisorn และ Wongwises (2009) (n) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

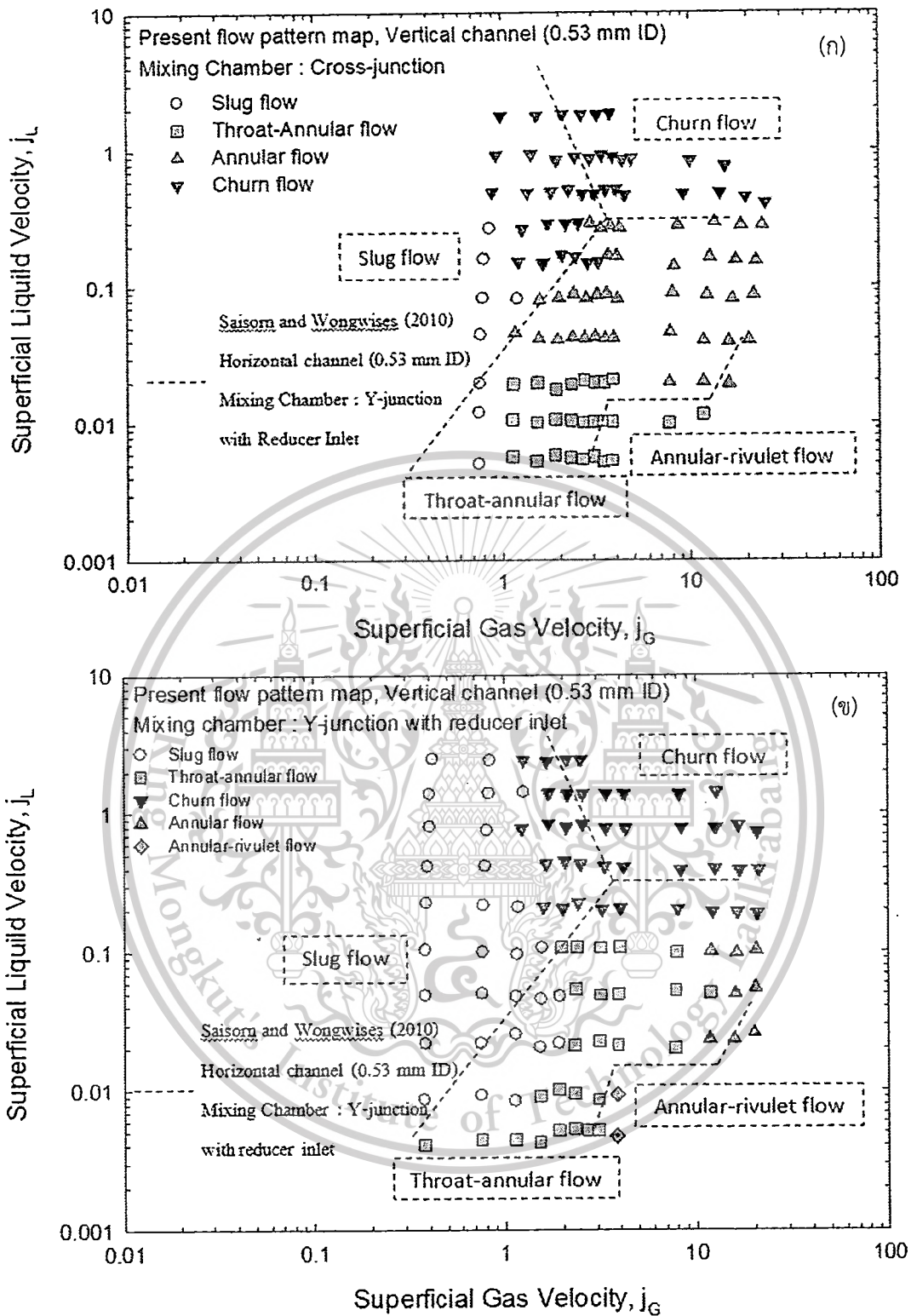


รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Saisorn และ Wongwises (2010) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

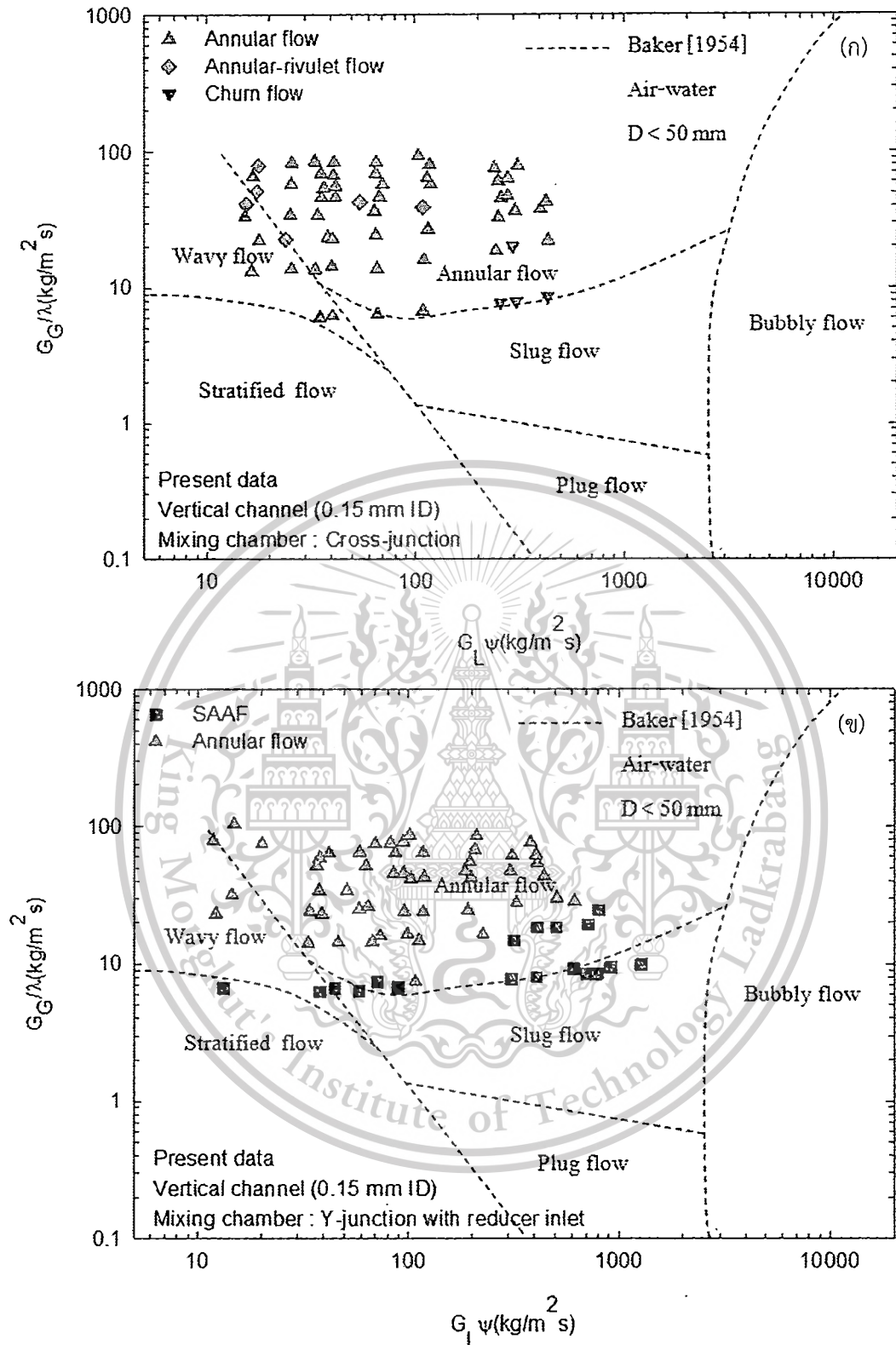


รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Saisorn และ Wongwises (2010) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

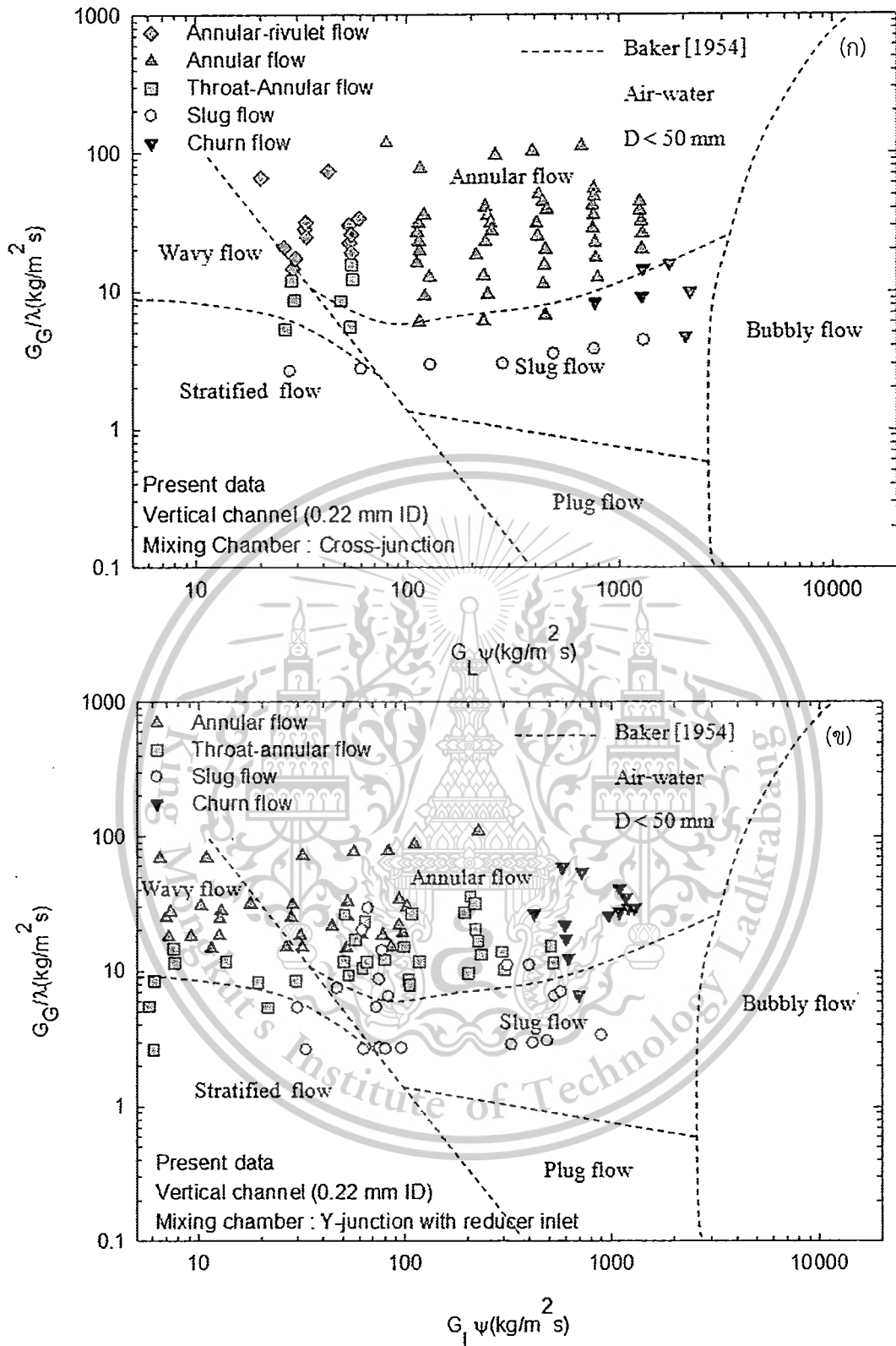


รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Baker (1954) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

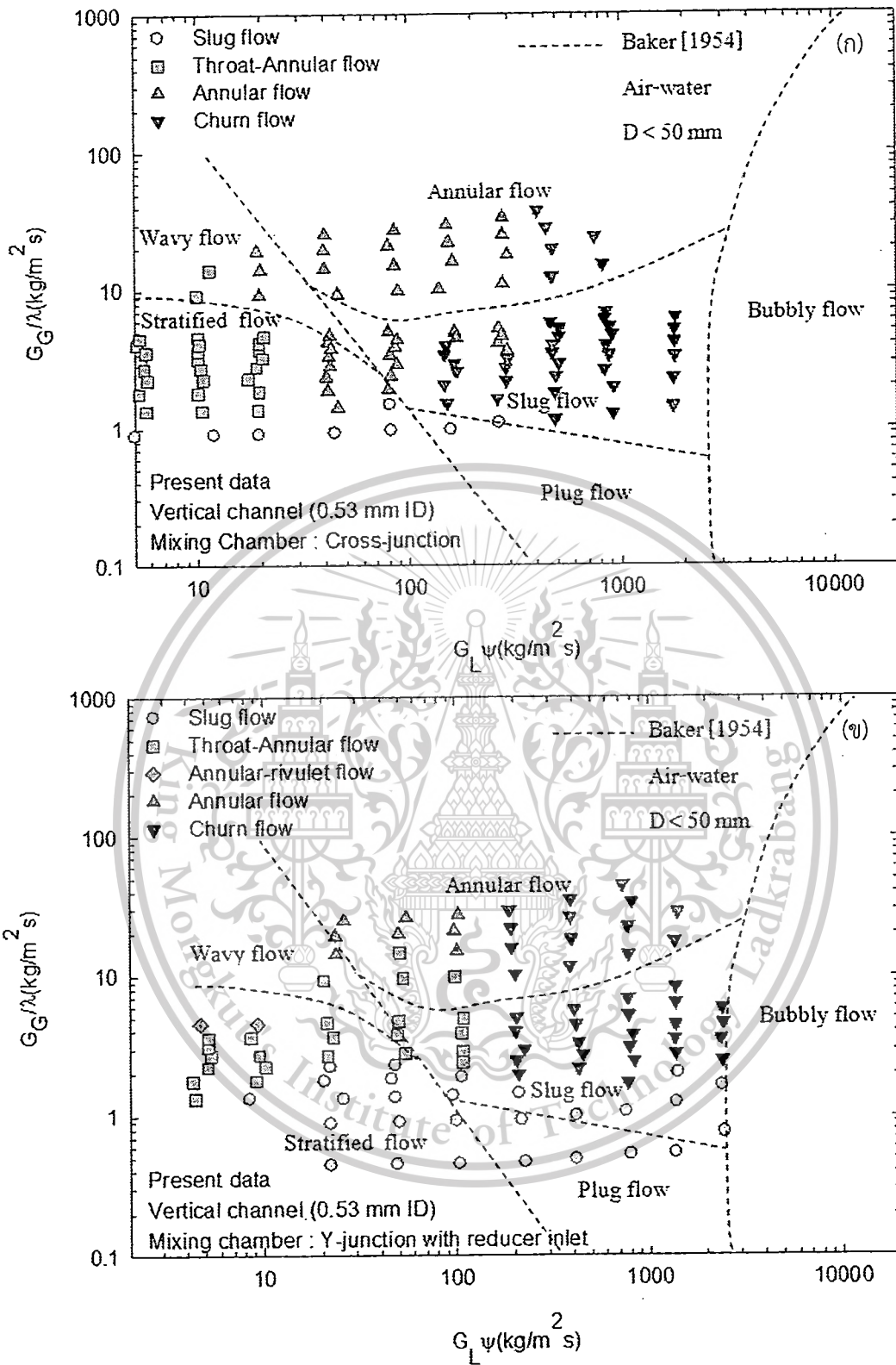


รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Baker (1954) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

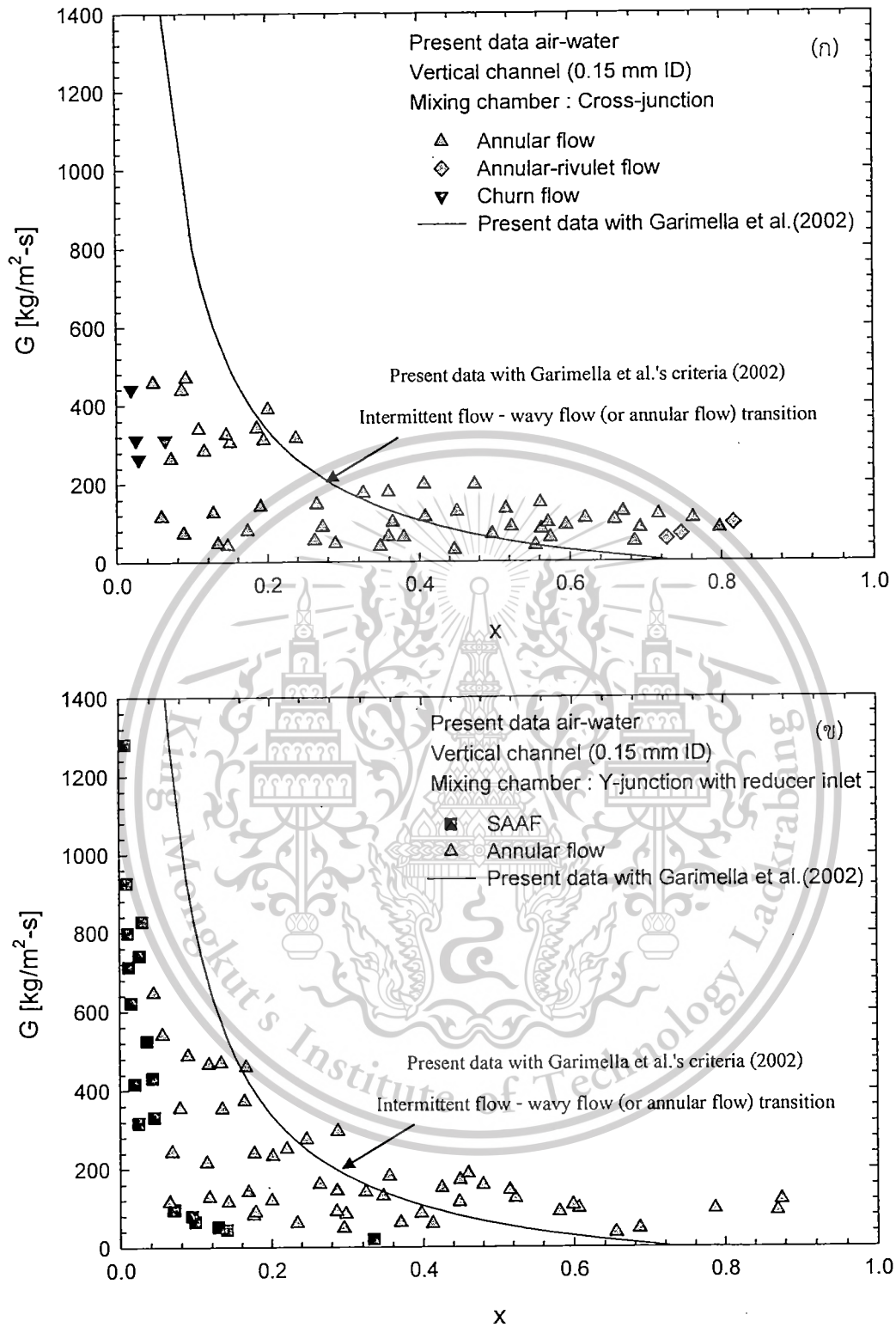


รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Baker (1954) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

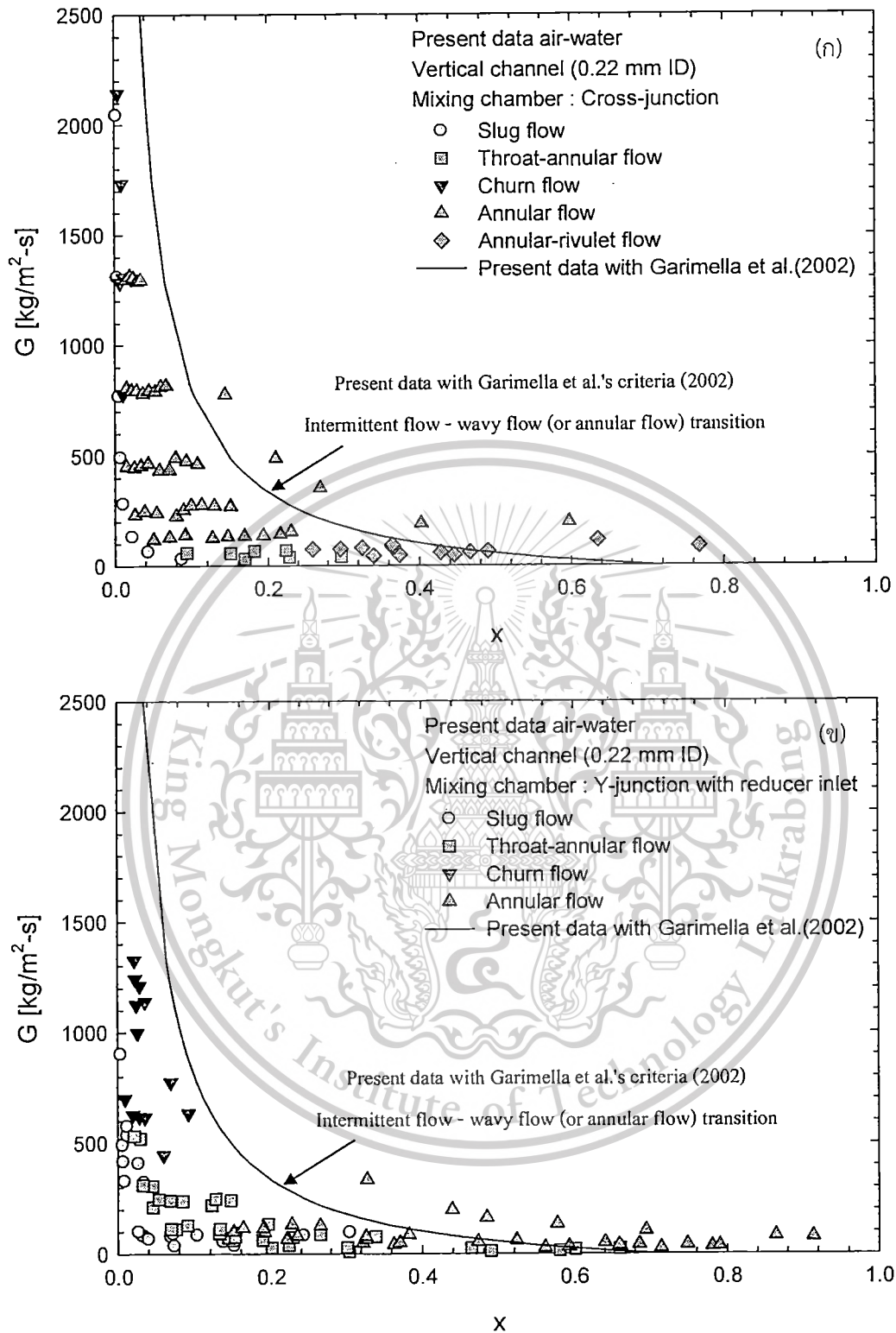


รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Garimella และคณะ (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

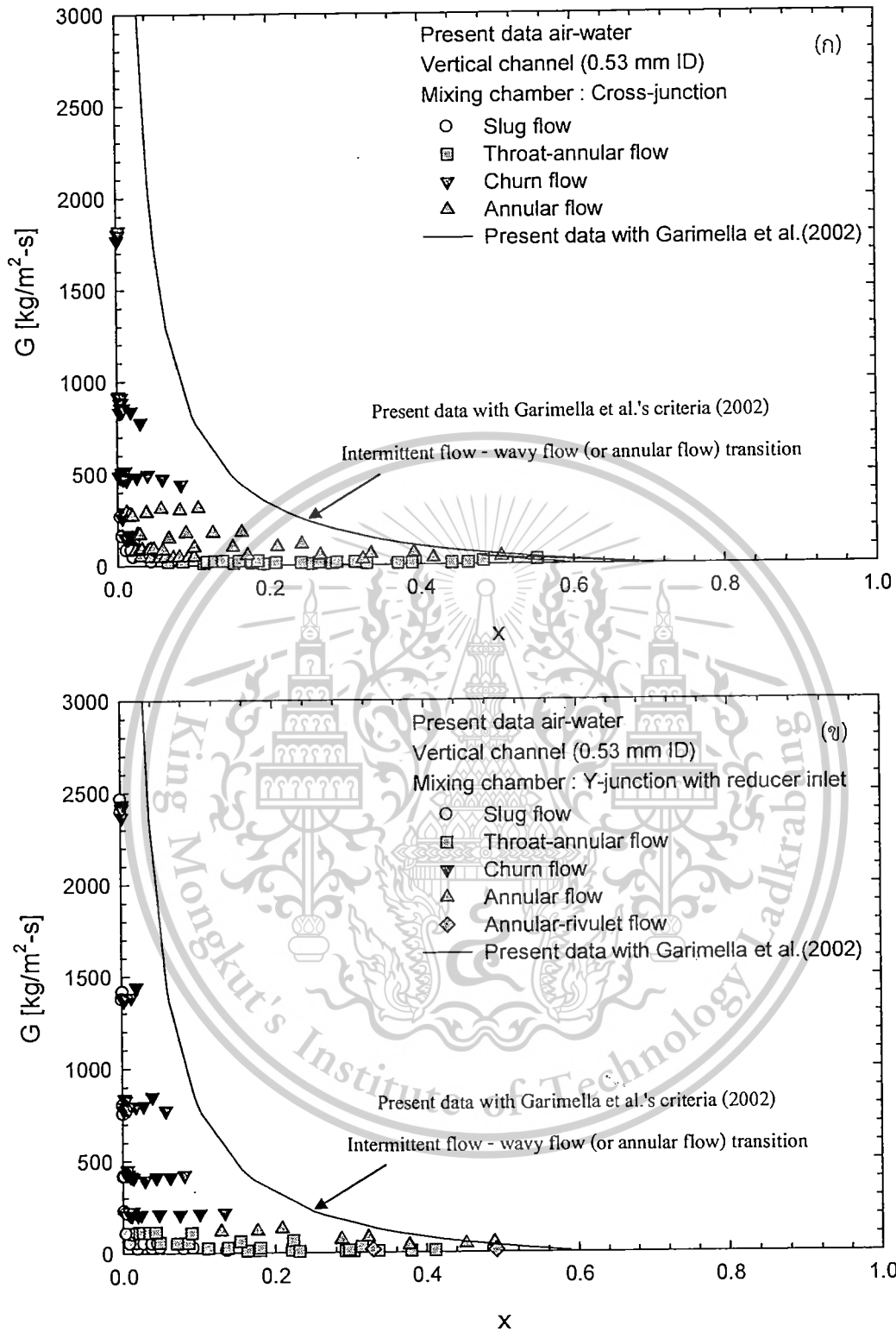


รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Garimella และคณะ (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

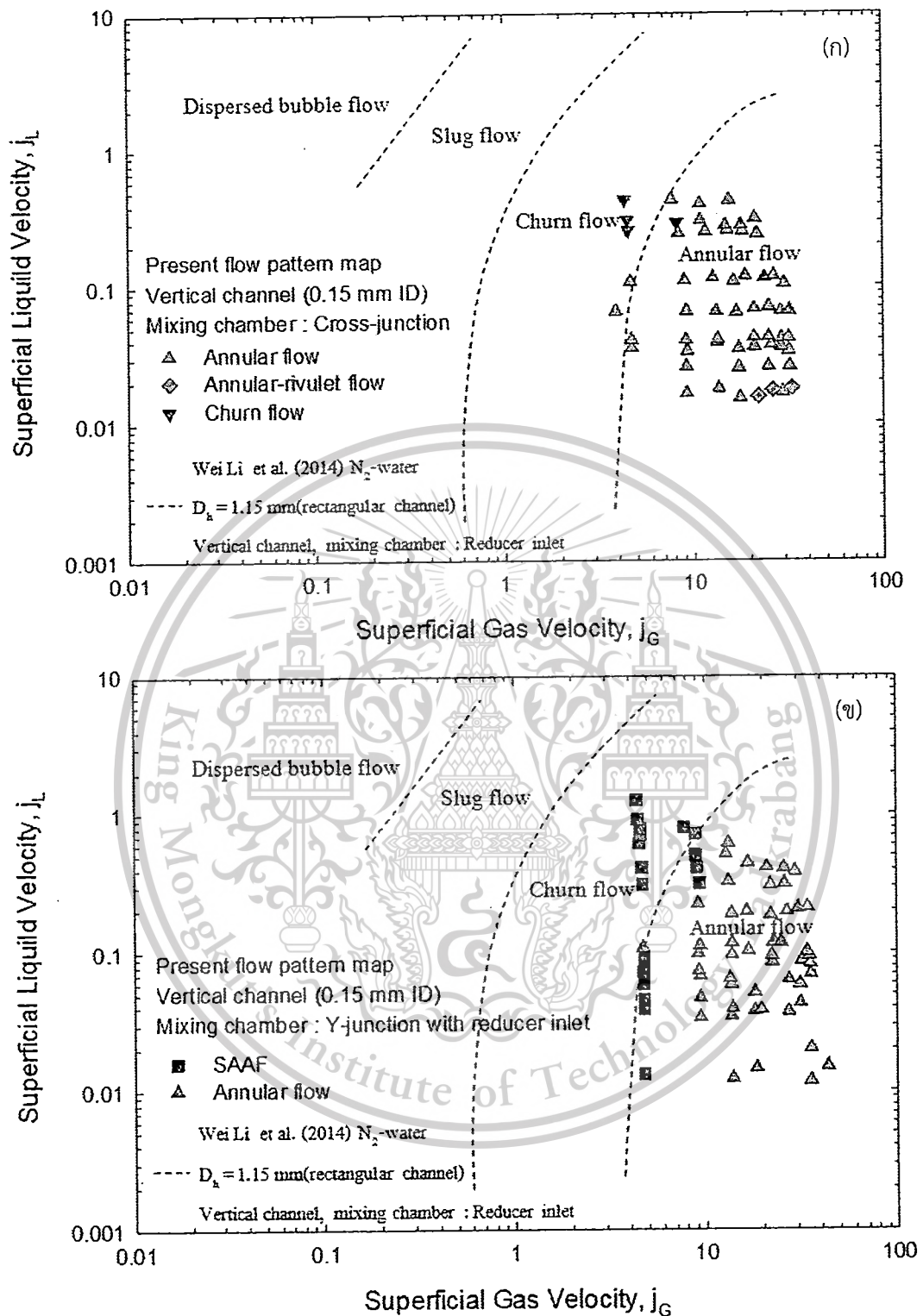


รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Garimella และคณะ (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

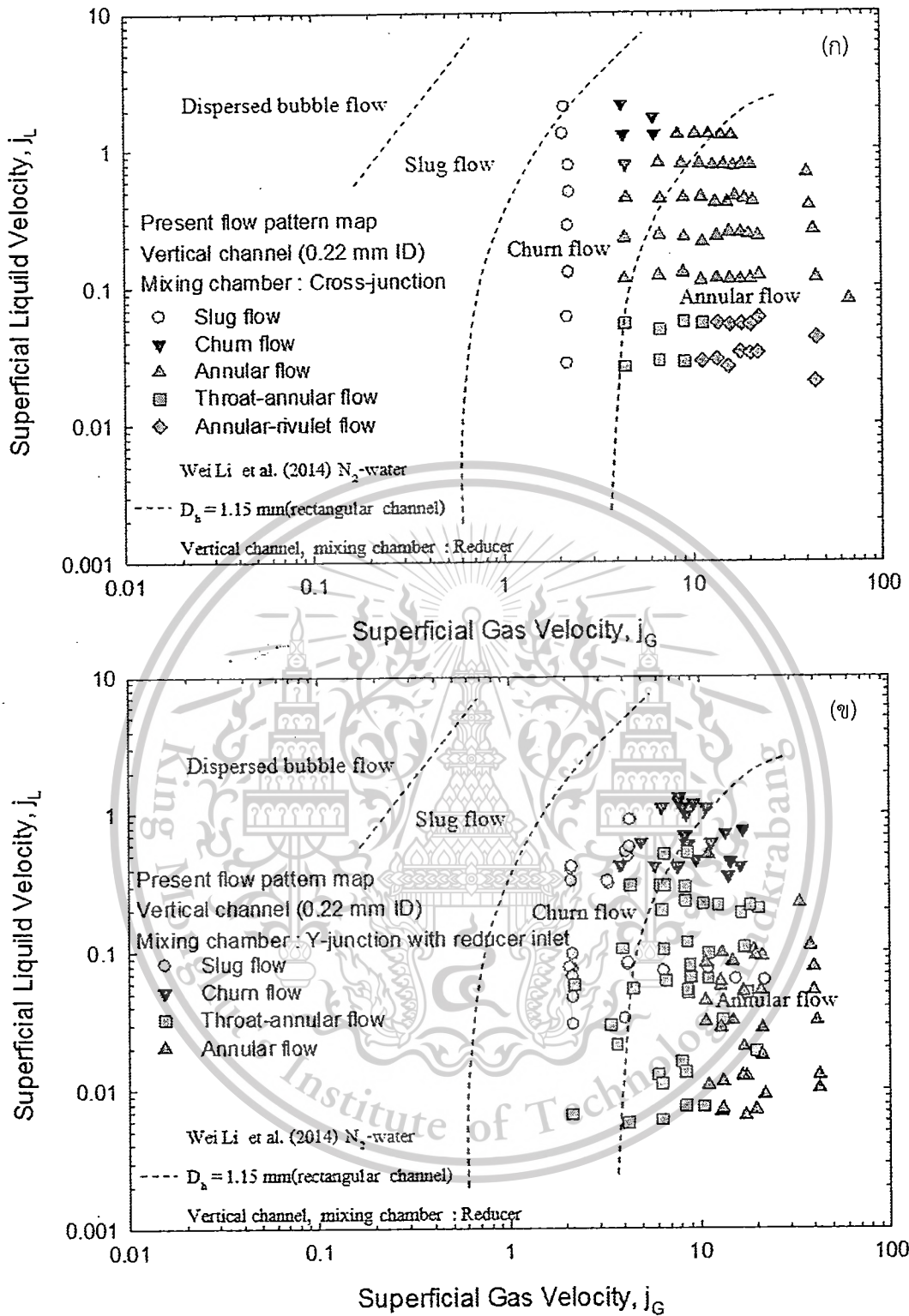


รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Wei Li และ คณะ (2014) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

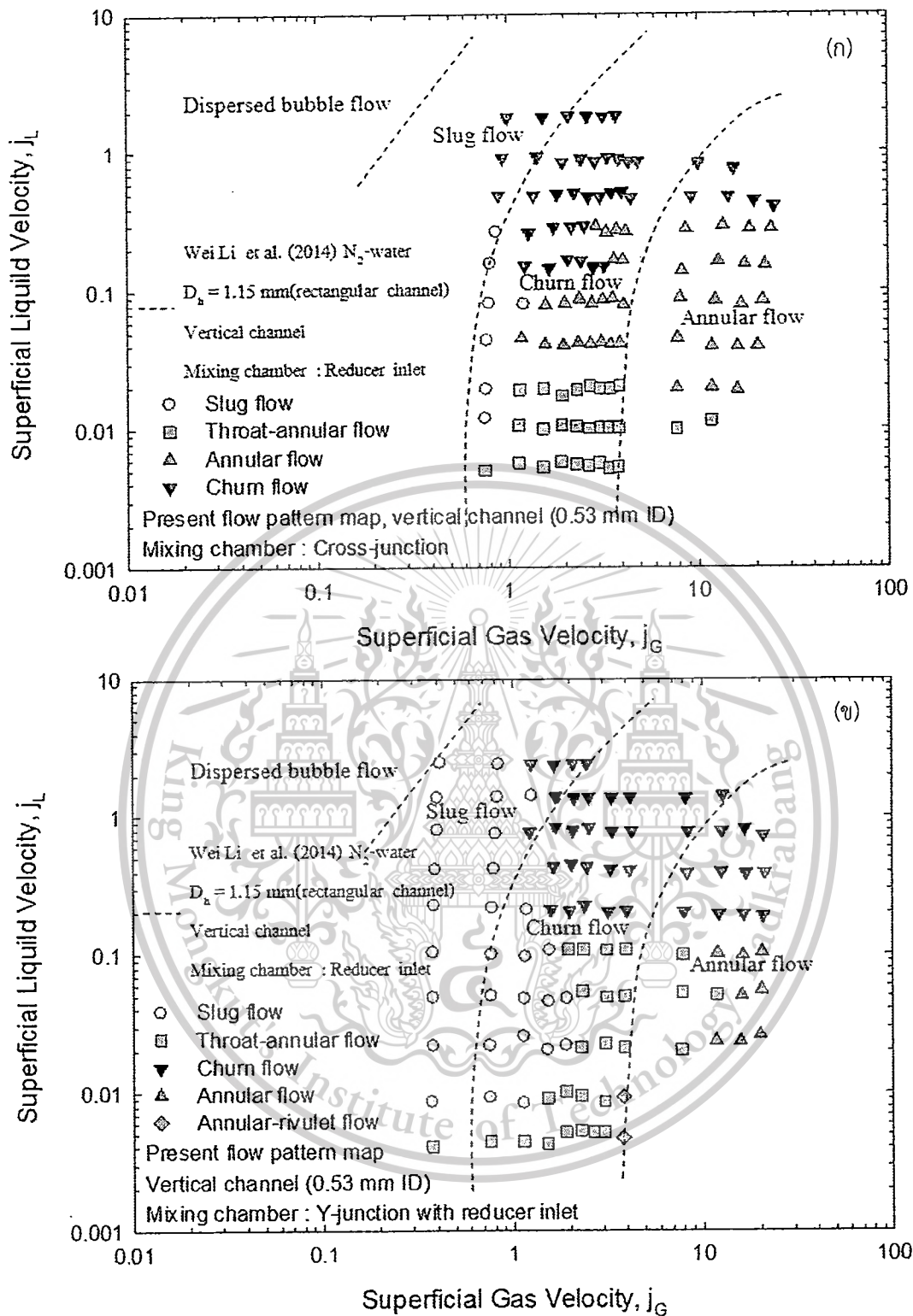


รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Wei Li และ คณะ (2014) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

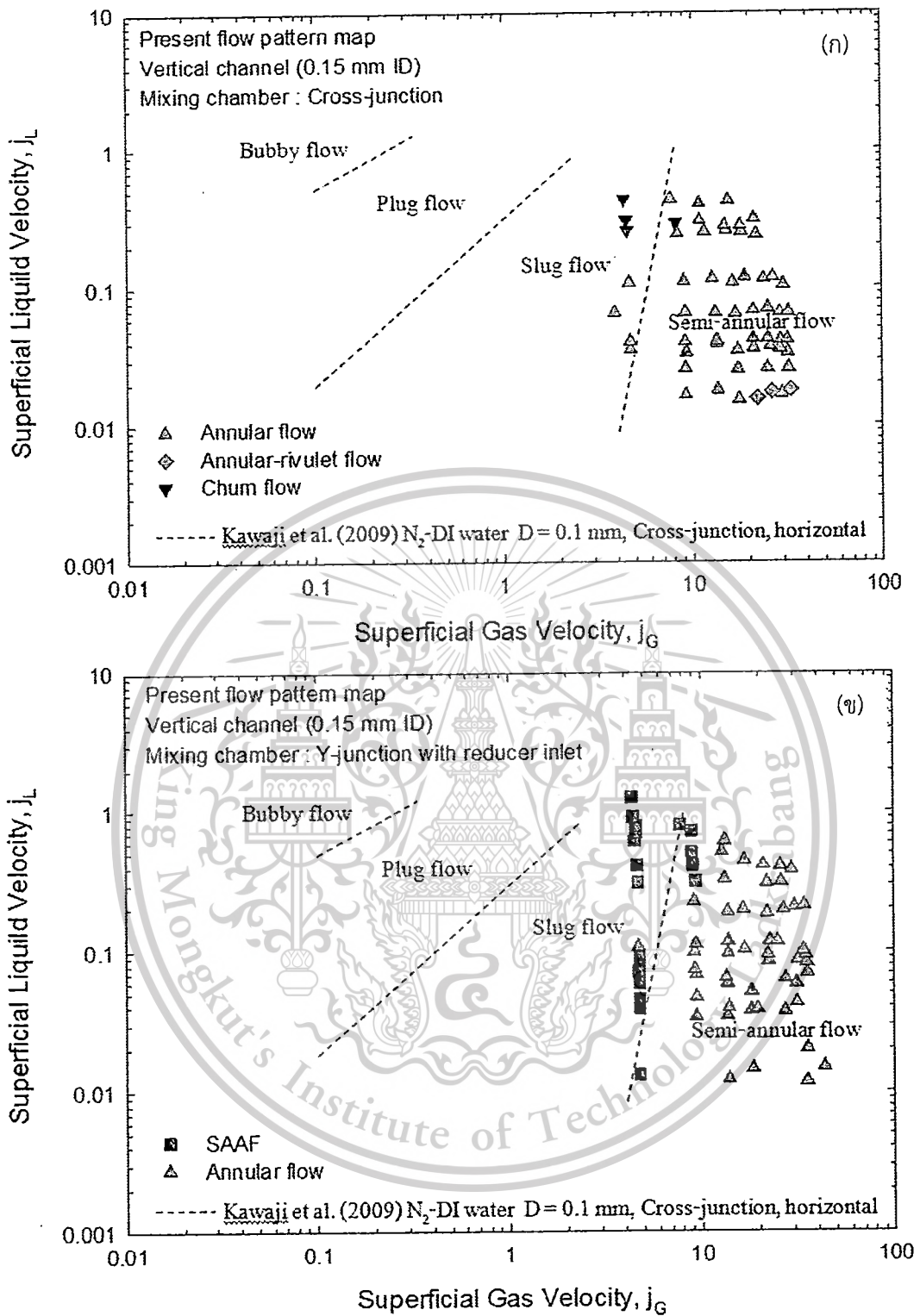


รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Wei Li และ คณะ (2014) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

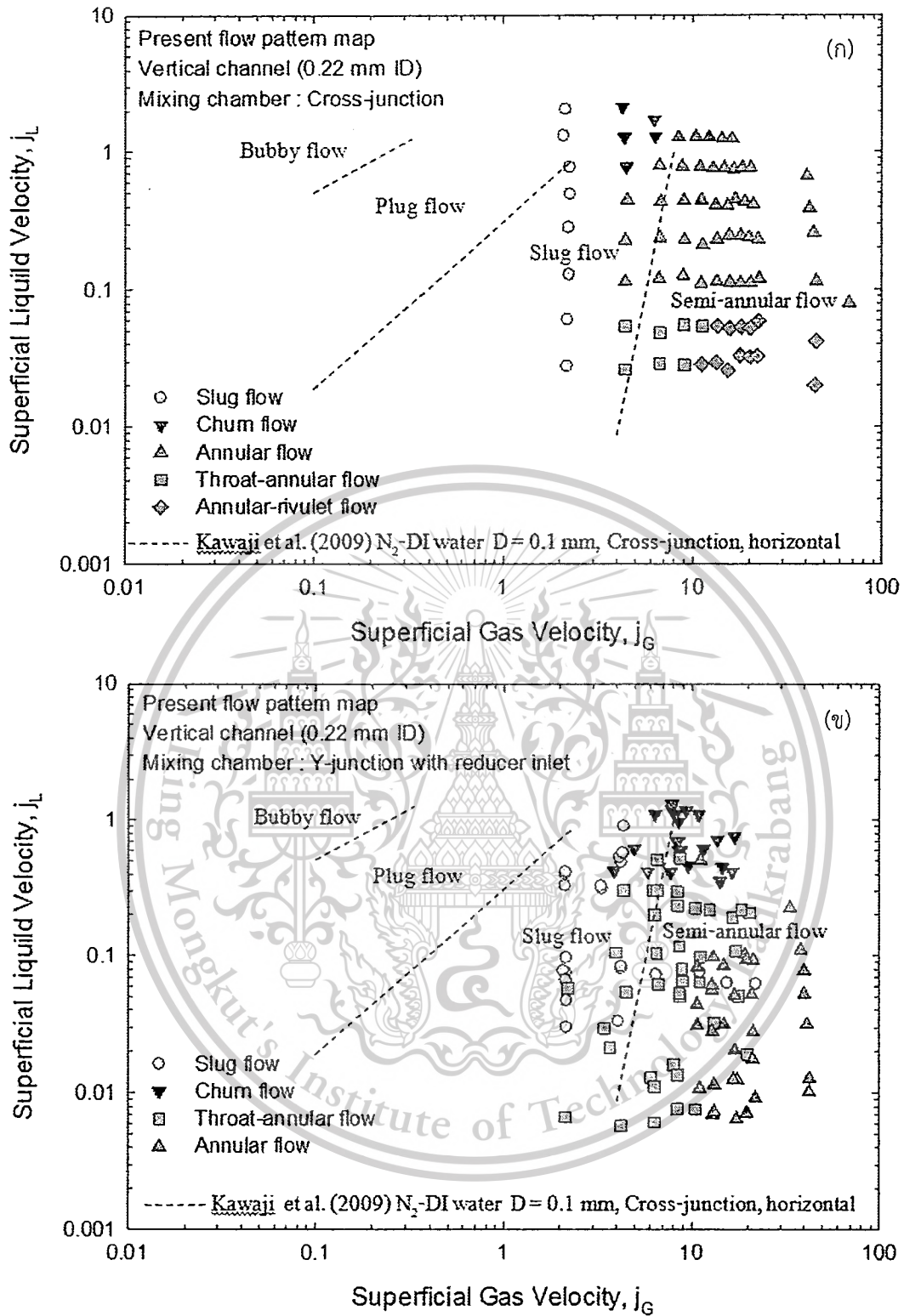


รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Kawaji และ คณะ (2009) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

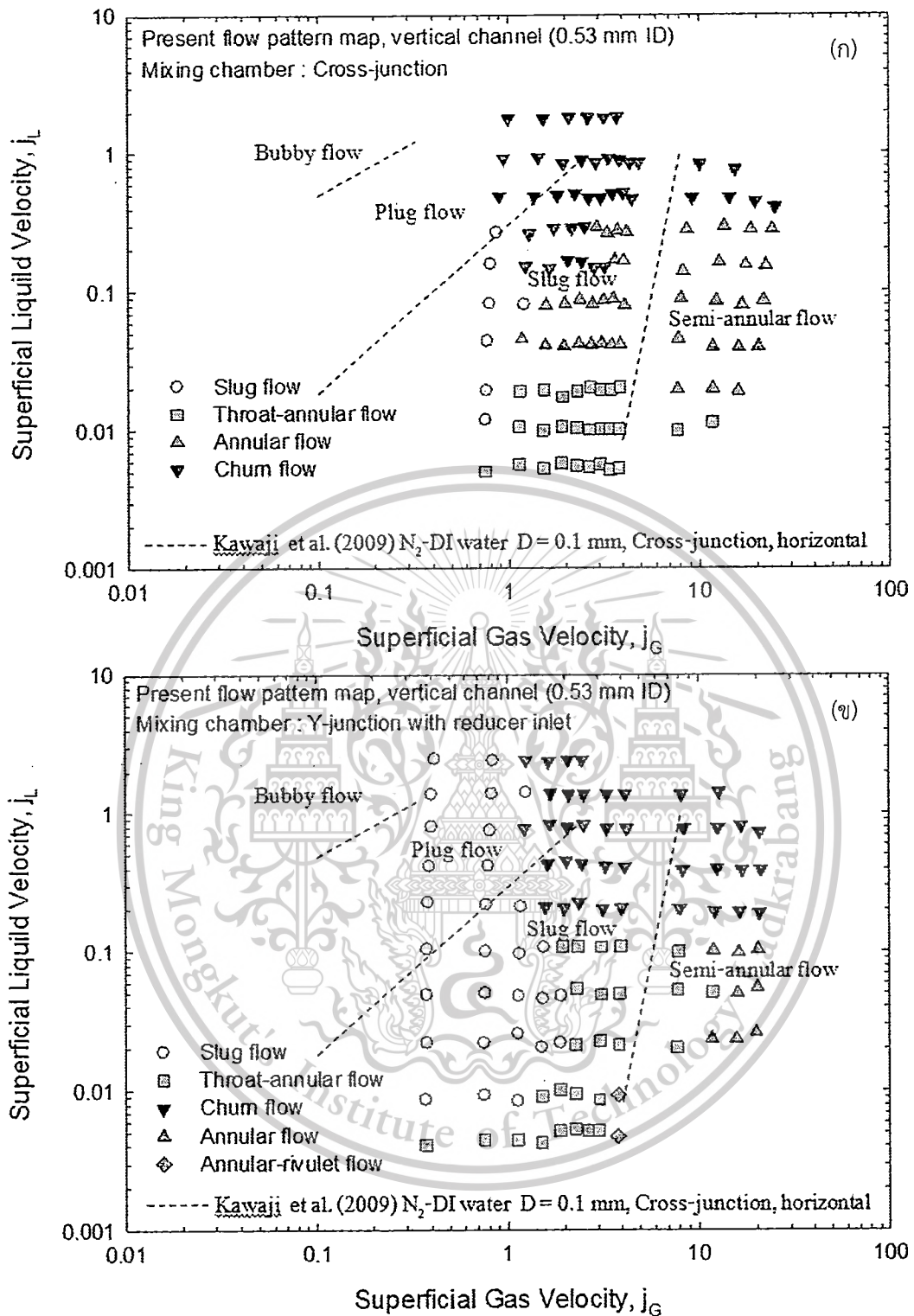


รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Kawaji และ คณะ (2009) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

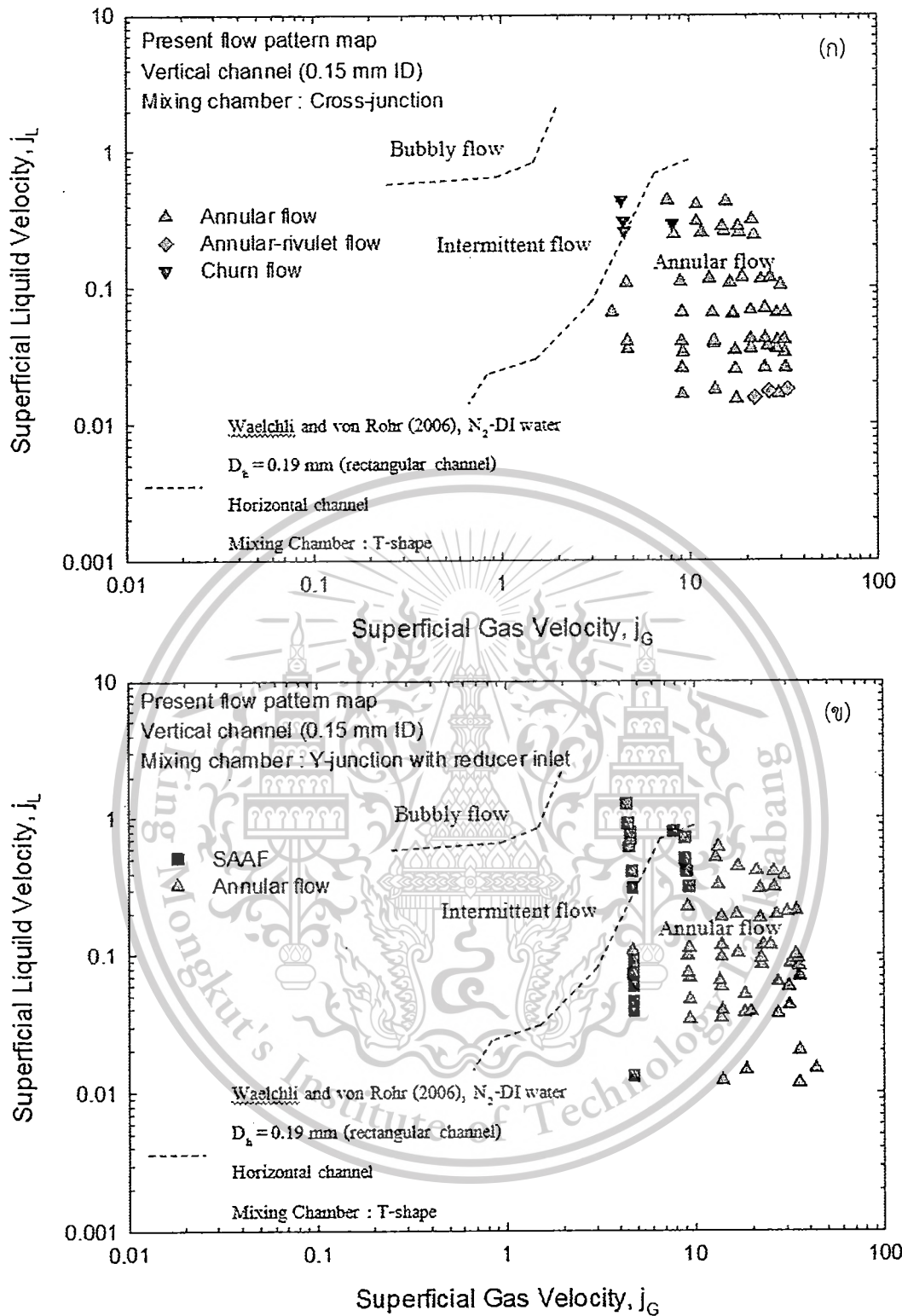


รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Kawaji และ คณะ (2009) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก้ารนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

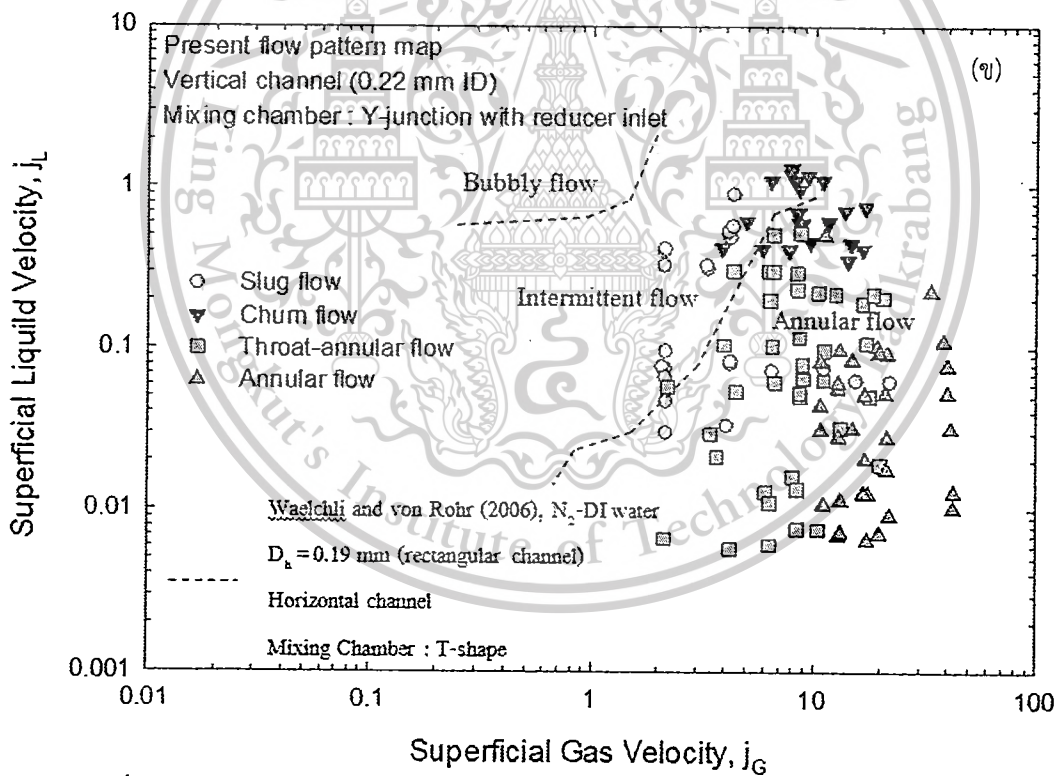
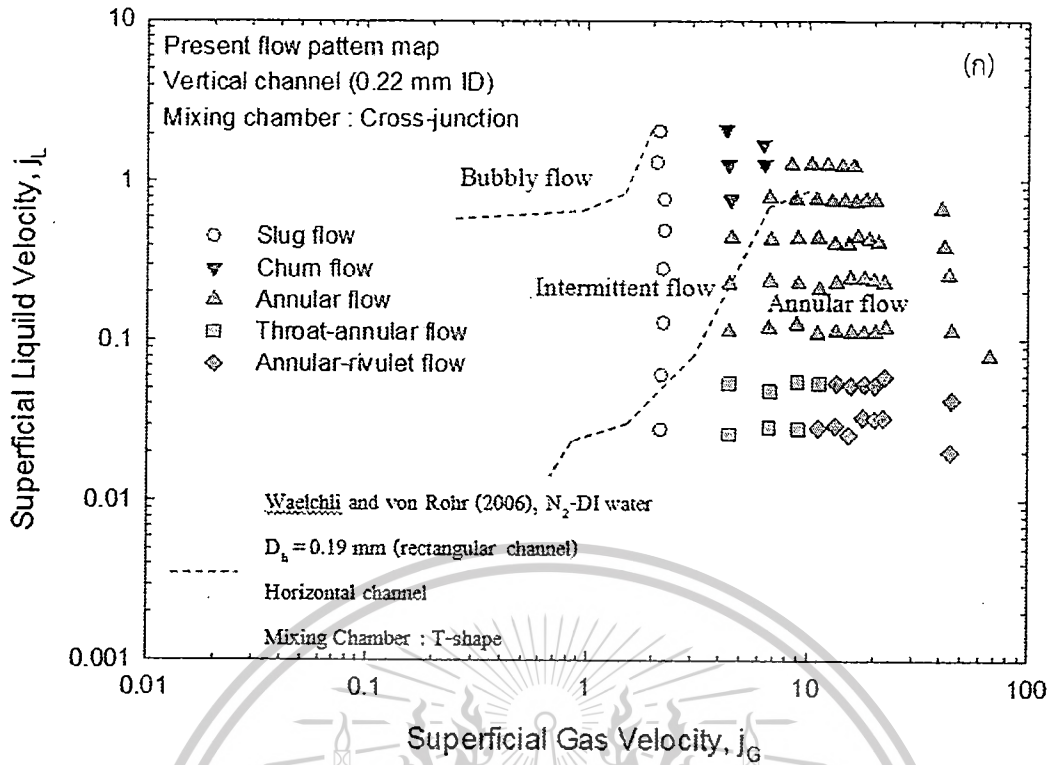


รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Waelchi และ von Rohr (2006) (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

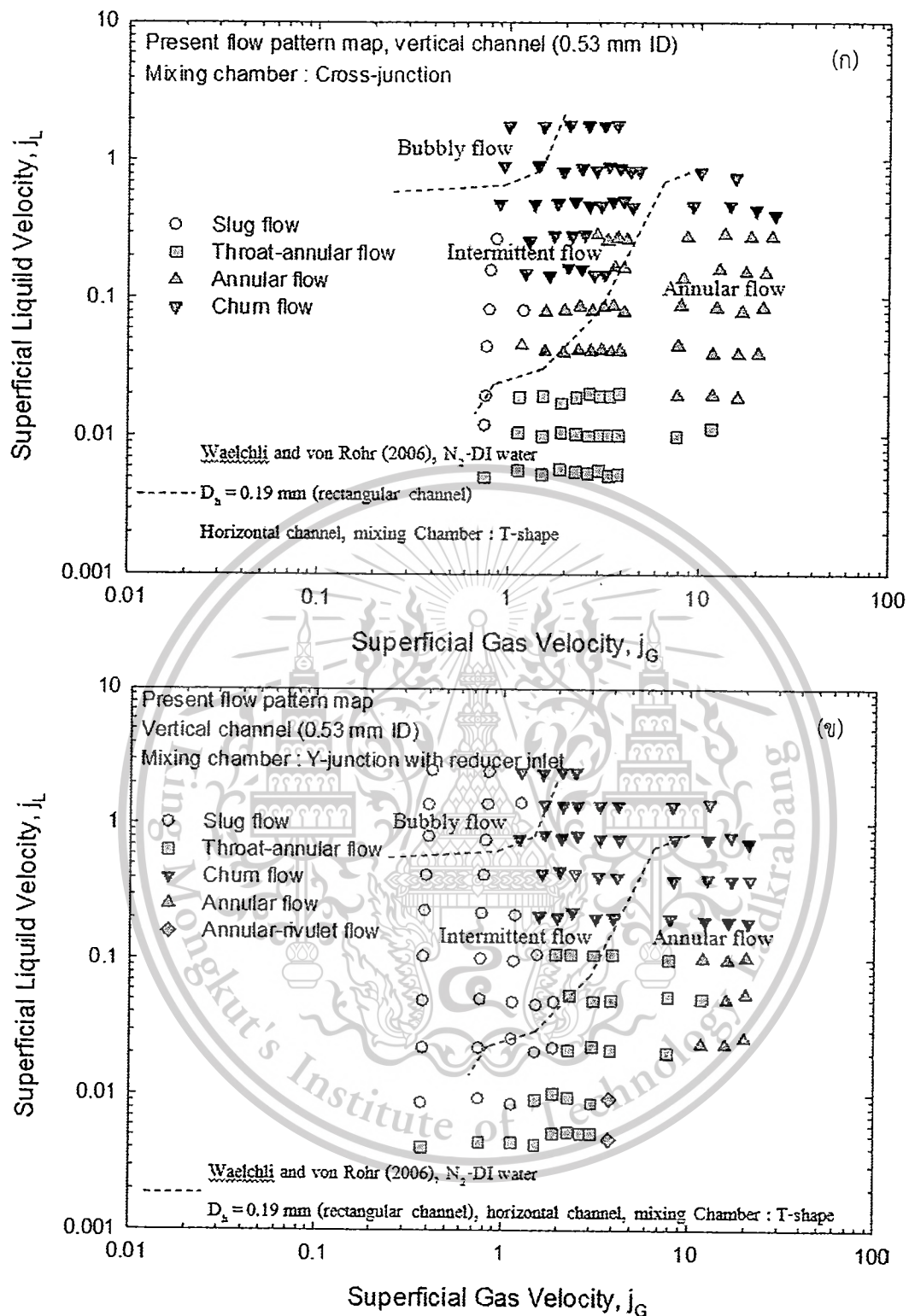


รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Waelchi และ von Rohr (2006) (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลกับเส้นแบ่งขอบเขต โดย Waelchli และ von Rohr (2006) (n) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use. ☹️

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ในงานปัจจุบันของ mixing chamber แบบ Cross-junction กับผลการทดลองท่อไมโครแชนแนลในแนวนอน โดย Saisorn และ Wongwises (2009) พบว่ารูปแบบการไหลในงานปัจจุบันมีความเสถียรมากกว่าในงานของ Saisorn และ Wongwises เนื่องมาจากงานของ Saisorn และ Wongwises ใช้ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet และการวางตัวของท่อเป็นแนวนอน ดังนั้นท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดเล็ก แรงโน้มถ่วงยังสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการไหลที่สารทำงานไหลขึ้นในแนวตั้งแตกต่างจากท่อที่วางตัวในแนวนอน เนื่องจาก buoyancy force ในการไหลขึ้นไปตามแนวตั้ง

การเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ในงานปัจจุบันของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet กับผลการทดลองท่อไมโครแชนแนลในแนวนอน โดย Saisorn และ Wongwises (2009) พบว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนเป็นผลเนื่องมาจากวางตัวของท่อ แม้ว่าท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดเล็ก แรงโน้มถ่วงยังสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการไหลที่สารทำงานไหลขึ้นในแนวตั้งแตกต่างจากท่อที่วางตัวในแนวนอน เนื่องจาก buoyancy force ในการไหลขึ้นไปตามแนวตั้ง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ใน mixing chamber แบบ Cross-junction กับผลการทดลองท่อไมโครแชนแนลในแนวนอน โดย Saisorn และ Wongwises (2010) พบว่า slug flow, churn flow, throat-annular flow และ annular flow อยู่ในโซน throat-annular flow ของ Saisorn และ Wongwises (2010) และ annular flow บางส่วน และ annular-rivulet flow ของ mixing chamber แบบ Cross-junction อยู่ในโซน annular flow ของ Saisorn และ Wongwises (2010) ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.14(ก) อย่างไรก็ตามผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า slug flow, churn flow, throat-annular อยู่ในโซน throat-annular ของ Saisorn และ Wongwises (2010) และ annular flow ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet อยู่ในโซน annular flow, annular-rivulet flow ของ Saisorn and Wongwises (2010) ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.14(ข) แม้ว่าท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีขนาดเล็ก แรงโน้มถ่วงยังสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการไหลที่สารทำงานไหลขึ้นในแนวตั้งแตกต่างจากท่อที่วางตัวในแนวนอน เนื่องจาก buoyancy force ในการไหลขึ้นไปตามแนวตั้ง gas slug ที่ต่อเนื่องกันทำให้นำไปสู่การพัฒนาเป็น churn flow ในท่อทิศทางนี้

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ใน mixing chamber แบบ Cross-junction กับผลการทดลองท่อไมโครแชนแนลในแนวนอน โดย Saisorn และ Wongwises (2010) พบว่าในงานปัจจุบันมีความสอดคล้องกับรูปแบบการไหลของ throat-annular flow ของงาน Saisorn and Wongwises (2010) และไม่พบรูปแบบการไหล annular-rivulet flow ในงานปัจจุบัน ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.15(ก) อย่างไรก็ตามผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าค่อนข้างมีความสอดคล้องเนื่องมาจากใช้ mixing chamber ชนิดเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าผลของ mixing chamber มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับท่อขนาดใหญ่โดย Baker(1954) กับผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Cross-junction ในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สามารถทำนายได้บางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบการไหล annular flow ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.16(ก) และผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าทำนายได้บางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบการไหล annular flow ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.16(ข)

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับท่อขนาดใหญ่โดย Baker(1954) กับผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Cross-junction ในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร พบว่าทำนายได้บางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบการไหล slug flow, annular flow และ annular-rivulet ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.17(ก) และผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าทำนายได้บางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบการไหล slug flow และ annular flow ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.17(ข)

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับท่อขนาดใหญ่โดย Baker(1954) กับผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Cross-junction ในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร พบว่ารูปแบบการไหล throat-annular flow และ slug flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ stratified flow ของงาน Baker(1954) annular flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Baker(1954) และ churn flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ slug flow ของงาน Baker(1954) ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.18(ก) และผลการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ในงานปัจจุบันพบว่ารูปแบบการไหล throat-annular flow, annular rivulet flow และ slug flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ stratified flow ของงาน Baker(1954) และ annular flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Baker(1954) และ churn flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ slug flow และ annular flow ของงาน Baker(1954) ดังแสดงให้เห็นภาพในรูปที่ 5.18(ข) จากการเปรียบเทียบทั้ง 2 mixing chamber พบว่าทำนายได้เพียงเล็กน้อย

ผลการทดลองในงานปัจจุบันเปรียบเทียบกับเส้นแบ่งขอบเขตรูปแบบการไหล โดย Garimella และ คณะ (2002) สังเกตเห็นว่าเส้นทำนายไม่สามารถใช้ทำนายได้ ดังแสดงให้เห็นภาพ 5.19-5.21(ก), (ข)

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ในงานปัจจุบันของ mixing chamber แบบ Cross-junction กับผลการทดลองท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยมของ Wei Li และ คณะ (2014) พบว่า churn flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน churn flow ของ Wei Li และ คณะ แต่ annular flow และ annular-rivulet flow อยู่ในโซน annular flow ของ Wei Li และ คณะ อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า slug/annular alternating flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน churn flow ของ Wei Li และ คณะ และ annular flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน annular flow ของ Wei Li และ คณะ ดังแสดงให้ภาพในรูปที่ 5.22 (ก) และ (ข)

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ในงานปัจจุบันของ mixing chamber แบบ Cross-junction กับผลการทดลองท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยมของ Wei Li และ คณะ (2014) พบว่า slug flow และ churn flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน churn flow ของ Wei Li และ คณะ แต่ throat-annular flow, annular flow และ annular-rivulet flow อยู่ในโซน annular flow ของ Wei Li และ คณะ อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า slug

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

flow และ churn flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน churn flow ของ Wei Li และ คณะ แต่ throat-annular flow และ annular flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน annular flow ของ Wei Li และ คณะ ดังแสดงให้ภาพในรูปที่ 5.23 (ก) และ (ข)

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ในงานปัจจุบันของ mixing chamber แบบ Cross-junction กับผลการทดลองท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยมของ Wei Li และ คณะ (2014) พบว่า slug flow, annular flow บางส่วน, throat-annular flow และ churn flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน churn flow ของ Wei Li และ คณะ แต่ annular flow อีกส่วน อยู่ในโซน annular flow ของ Wei Li และ คณะ อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า slug flow บางส่วน ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน slug flow ของ Wei Li และ คณะ แต่ slug flow บางส่วน, churn flow บางส่วน และ throat-annular flow และ annular-rivulet flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน churn flow ของ Wei Li และ คณะ แต่ churn flow บางส่วน และ annular flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซน annular flow ของ Wei Li และ คณะ ดังแสดงให้ภาพในรูปที่ 5.24 (ก) และ (ข) ความแตกต่างเกิดจากในท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยมมีความหนาไม่สม่ำเสมอของฟิล์มของเหลวเนื่องจากผลกระทบที่มุมซึ่งเป็นความแตกต่างหลักกับท่อไมโครแชนแนลกลม เพราะท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยมมีสี่มุมซึ่งแสดงให้เห็น aspect ratio effect ของรูปแบบการไหล Wei Li และ คณะ (2011)

งานก่อนหน้านี้โดย Kawaji และ คณะ (2009) เป็นท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100  $\mu\text{m}$  ในแนวนอน และมี mixing chamber แบบ cross-junction จากการเปรียบเทียบกับงานในปัจจุบันของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันในรูปแบบการไหลของ semi-annular flow ดังแสดงให้ภาพในรูปที่ 5.25 (ก) และ (ข)

งานก่อนหน้านี้โดย Kawaji และ คณะ (2009) เป็นท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100  $\mu\text{m}$  ในแนวนอน และมี mixing chamber แบบ cross-junction จากการเปรียบเทียบกับงานในปัจจุบันของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันในรูปแบบการไหลของ slug flow และ semi-annular flow ดังแสดงให้ภาพในรูปที่ 5.26 (ก) และ (ข) ที่ไม่พบรูปแบบการไหลแบบ bubbly flow และ plug flow เพราะ ค่า superficial velocities of gas ที่การทดลองในปัจจุบันมีความเร็วมากกว่าของ Kawaji และ คณะ (2009) ที่ไม่พบรูปแบบการไหลแบบ bubbly flow และ plug flow เพราะ ค่า superficial velocities of gas ที่การทดลองในปัจจุบันมีความเร็วมากกว่าของ Kawaji และ คณะ (2009)

งานก่อนหน้านี้โดย Kawaji และ คณะ (2009) เป็นท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100  $\mu\text{m}$  ในแนวนอน และมี mixing chamber แบบ cross-junction จากการเปรียบเทียบกับงานในปัจจุบันของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันในรูปแบบการไหลของ slug flow และ semi-annular flow ดังแสดงให้ภาพในรูปที่ 5.27 (ก) และ (ข)

ในรูปที่ 5.28 (ก) และ (ข) แสดงเส้นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลที่ได้รับจากการไหลสองสถานะของไนโตรเจนและ DI water ในท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยม ของ Waelchli และ von Rohr (2006) เปรียบเทียบกับแผนภูมิรูปแบบการไหลในการทดลองในปัจจุบันของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Cross-junction ข้อมูลเกือบทั้งหมดส่วนใหญ่ยกเว้น churn flow อยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006) ในผลการทดลองของงานปัจจุบันที่มี mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document without permission.

ข้อมูลเกือบทั้งหมดส่วนใหญ่ยกเว้น slug/annular alternating flow บางส่วน อยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006)

ในรูปที่ 5.29 (ก) และ (ข) แสดงเส้นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลที่ได้รับจากการไหลสองสถานะของไนโตรเจนและ DI water ในท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยม ของ Waelchli และ von Rohr (2006) เปรียบเทียบกับแผนภูมิรูปแบบการไหลในการทดลองในปัจจุบันของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Cross-junction ข้อมูลเกือบทั้งหมดส่วนใหญ่ยกเว้น slug flow และ churn flow อยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006) และในผลการทดลองของงานปัจจุบันที่มี mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ข้อมูลเกือบทั้งหมดส่วนใหญ่ยกเว้น slug flow อยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006)

ในรูปที่ 5.30 (ก) และ (ข) แสดงเส้นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลที่ได้รับจากการไหลสองสถานะของไนโตรเจนและ DI water ในท่อไมโครแชนแนลสี่เหลี่ยม ของ Waelchli และ von Rohr (2006) เปรียบเทียบกับแผนภูมิรูปแบบการไหลในการทดลองในปัจจุบันของท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Cross-junction พบว่า slug flow และ churn flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ intermittent flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006) และ annular flow และ throat-annular flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006) ในผลการทดลองของงานปัจจุบันที่มี mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า slug flow และ churn flow บางส่วน ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ intermittent flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006) และ churn flow บางส่วน, annular flow, annular-rivulet flow และ throat-annular flow ในงานปัจจุบันอยู่ในโซนของ annular flow ของงาน Waelchli และ von Rohr (2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.2 สัดส่วนช่องว่าง(Void fraction)

สัดส่วนช่องว่างเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่ใช้ในการคำนวณ เทอมของแรงโน้มถ่วง และความเร่ง ในความดันลดของการไหลสองสถานะของแก๊สและของเหลวในท่อต่างๆ วิธีการที่แตกต่างกัน สำหรับการประเมินสัดส่วนช่องว่างได้ถูกนำมาใช้โดยนักวิจัยก่อนหน้านี้

สำหรับท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิคน้อยกว่า 1 mm อาจจะสามารถในการประเมินสัดส่วนช่องว่างโดยการวิเคราะห์ภาพ

งานในปัจจุบันสัดส่วนช่องว่างเป็นค่าเฉลี่ยโดยประมาณจาก 50-70 ภาพ การวิเคราะห์จากภาพถ่ายพิจารณาโดยสมมติว่าเป็นปริมาณทรงกระบอก สัดส่วนช่องว่างถูกวัดในหน่วยไมโครเมตรที่มีความถูกต้อง  $\pm 0.05$  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 จะสอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้นของสมการ (1) ซึ่งสอดคล้องกับhomogeneous flow model

$$\alpha = \beta \quad (1)$$

สัดส่วนช่องว่างที่ได้รับจากท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ใน Mixing chamber แบบ Cross-junction ซึ่งให้เห็นสัดส่วนช่องว่างซึ่งเป็นเชิงเส้นที่มีคุณภาพปริมาตรตามที่เห็นในสมการที่ (1) แนวโน้มของข้อมูลในปัจจุบันไม่สอดคล้องกับที่รายงานโดย Serizawa และคณะ (2002) ความแตกต่างอาจจะเป็นเพราะการวางตัวของท่อในทิศทางที่แตกต่างกัน

$$\alpha = 0.731\beta \quad (2)$$

สำหรับสัดส่วนช่องว่างที่ได้รับจากท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ใน Mixing chamber แบบ Y-junction with Reducer Inlet สัดส่วนช่องว่างจากการวัดพบว่าไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้น แต่ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์อย่างดีจากรูปแบบเชิงประจักษ์ของสมการที่ (2) ซึ่งได้รับการเสนอโดย Kawahara และคณะ (2002) ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีสาเหตุหลักมาจากการปรากฏตัวของรูปแบบการไหล gas core ที่มี slip ratios ขนาดใหญ่

$$\left( \alpha = \frac{0.03\beta^{0.5}}{1-0.97\beta^{0.5}} \right) \quad (3)$$

สำหรับสัดส่วนช่องว่างที่ได้รับจากท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ใน Mixing chamber แบบ Cross-junction และ Y-junction with Reducer Inlet สัดส่วนช่องว่างจากการวัดพบว่าไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงเส้น แต่ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์อย่างดีจากรูปแบบเชิงประจักษ์ของสมการที่ (2) ซึ่งได้รับการเสนอโดย Kawahara และคณะ (2002) ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีสาเหตุหลักมาจากการปรากฏตัวของรูปแบบการไหล gas core ที่มี slip ratios ขนาดใหญ่

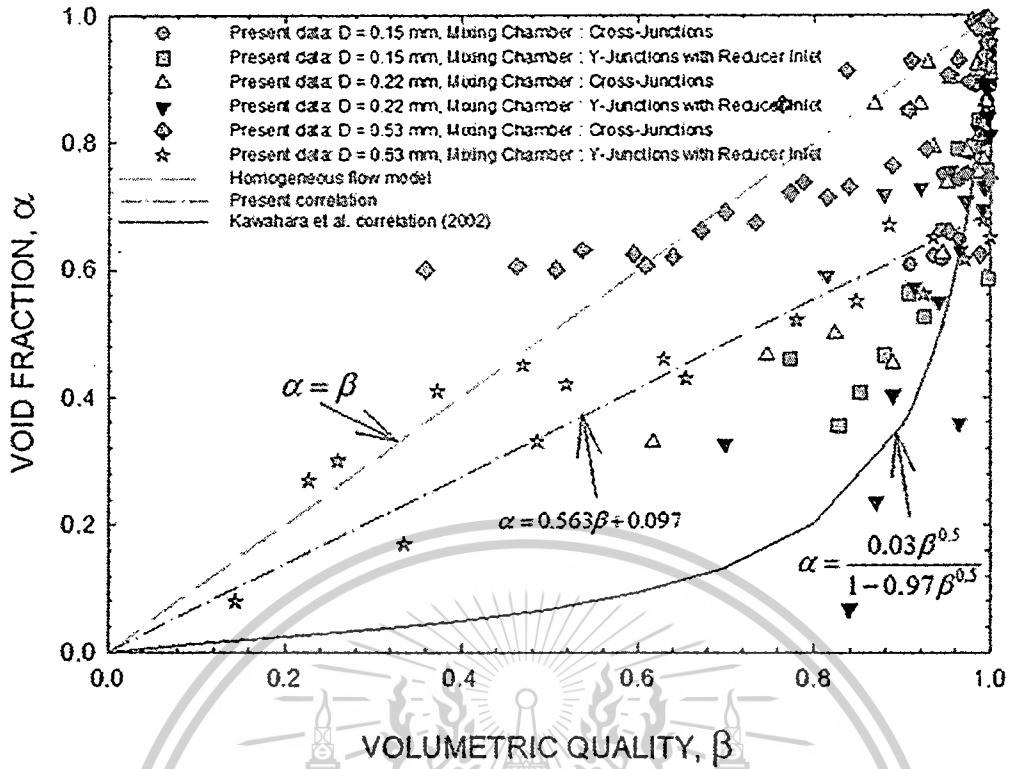
$$\left( \alpha = \frac{0.03\beta^{0.5}}{1-0.97\beta^{0.5}} \right) \quad (4)$$

ในสมการ (1) - (4) สัดส่วนช่องว่างแทนด้วย  $\alpha$  และคุณภาพปริมาตรจะถูกแทนด้วย  $\beta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.31 ข้อมูลลัดส่วนช่องว่างเทียบกับคุณภาพปริมาตรของท่อไมโครเซนแนลแนวตั้งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 5.3 ความดันลด(Pressure drop)

ในงานปัจจุบันวัดความดันครวมการไหลของอากาศ-น้ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร จะดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ความดันลดลงรวมของการไหลสองเฟสในช่องแนวตั้งจะแสดงโดยสมการความสมดุลต่อไปนี้ สมการที่ (5) ถูกนำไปใช้สำหรับท่อที่เชื่อมต่อกับ mixing chamber แบบ Y-junction และสมการที่ (6) ถูกนำไปใช้สำหรับท่อที่เชื่อมต่อกับ mixing chamber แบบ Cross-junction

$$\Delta P_{\text{exp}} = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_c + \Delta P_g \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{exp}} = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_g \quad (6)$$

เมื่อ  $\Delta P_f$  คือ ความดันลดลงจากเสียดทาน  $\Delta P_a$  คือ ความดันลดลงจากความเร่ง  $\Delta P_c$  คือ ความดันลดลงจากการหดตัวของปลิ้น และ  $\Delta P_g$  คือ ความดันลดลงจากแรงโน้มถ่วง ทั้ง 3 ความดันลด สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\Delta P_a = G^2 \left\{ \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right]_{\text{outlet}} - \left[ \frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right]_{\text{inlet}} \right\} \quad (7)$$

$$\Delta P_c = \frac{G^2}{2\rho_L} \left[ \left( \frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 + \left( 1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \left[ 1 + \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) x \right] \quad (8)$$

$$\Delta P_g = gL \sin \theta [\alpha \rho_G + (1 - \alpha)\rho_L] \quad (9)$$

ในสมการ (7) และ (8),  $x$  คือ mass quality,  $\alpha$  คือ สัดส่วนช่องว่าง,  $G$  คือ mass velocity,  $C_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการหดตัวซึ่งสามารถได้รับโดย Chisholm (1983) ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$C_c = \frac{1}{0.639 \left[ 1 - \left( \frac{1}{\gamma} \right) \right]^2 + 1} \quad (10)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ อัตราส่วนของพื้นที่การไหล cross-section กับส่วนทดสอบ(Test section)

ความดันลดจากความเสียดทานในการศึกษาครั้งนี้จะถูกคำนวณโดยการลบเทอมของความเร่งเทอมของแรงโน้มถ่วง และเทอมของการหดตัวของปลิ้น จากความดันลดลงรวม ดังแสดงให้เห็นภาพดังรูปที่ 5.32-5.34 (ก), (ข) แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของความดันลดสำหรับการไหลของอากาศ-น้ำในช่องแนวตั้ง จะเห็นได้จากรูปว่าความดันลดจากเสียดทานมีค่ามากกว่าทั้ง 3 ความดันลด

ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Cross-junction พบว่าความดันลดของรูปแบบการไหล annular flow มีความดันลดน้อยกว่า annular-rivulet flow และ churn flow มีความดันลดน้อยกว่า annular-rivulet flow

ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าความดันลดของรูปแบบการไหล slug/annular alternating flow มีความดันลดน้อยกว่า annular flow

ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Cross-junction พบว่าความดันลดของรูปแบบการไหล slug flow, throat-annular flow, churn flow, annular-rivulet flow และ annular flow มีความดันลดมากขึ้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าความดันลดของรูปแบบการไหล slug flow, throat-annular flow, churn flow และ annular flow มีความดันลดมากขึ้นตามลำดับ

ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Cross-junction พบว่าความดันลดของรูปแบบการไหล slug flow, throat-annular flow, churn flow และ annular flow มีความดันลดมากขึ้นตามลำดับ

ความดันลดสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ที่มี mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าความดันลดของรูปแบบการไหล slug flow, throat-annular flow, churn flow และ annular flow มีความดันลดมากขึ้นตามลำดับ

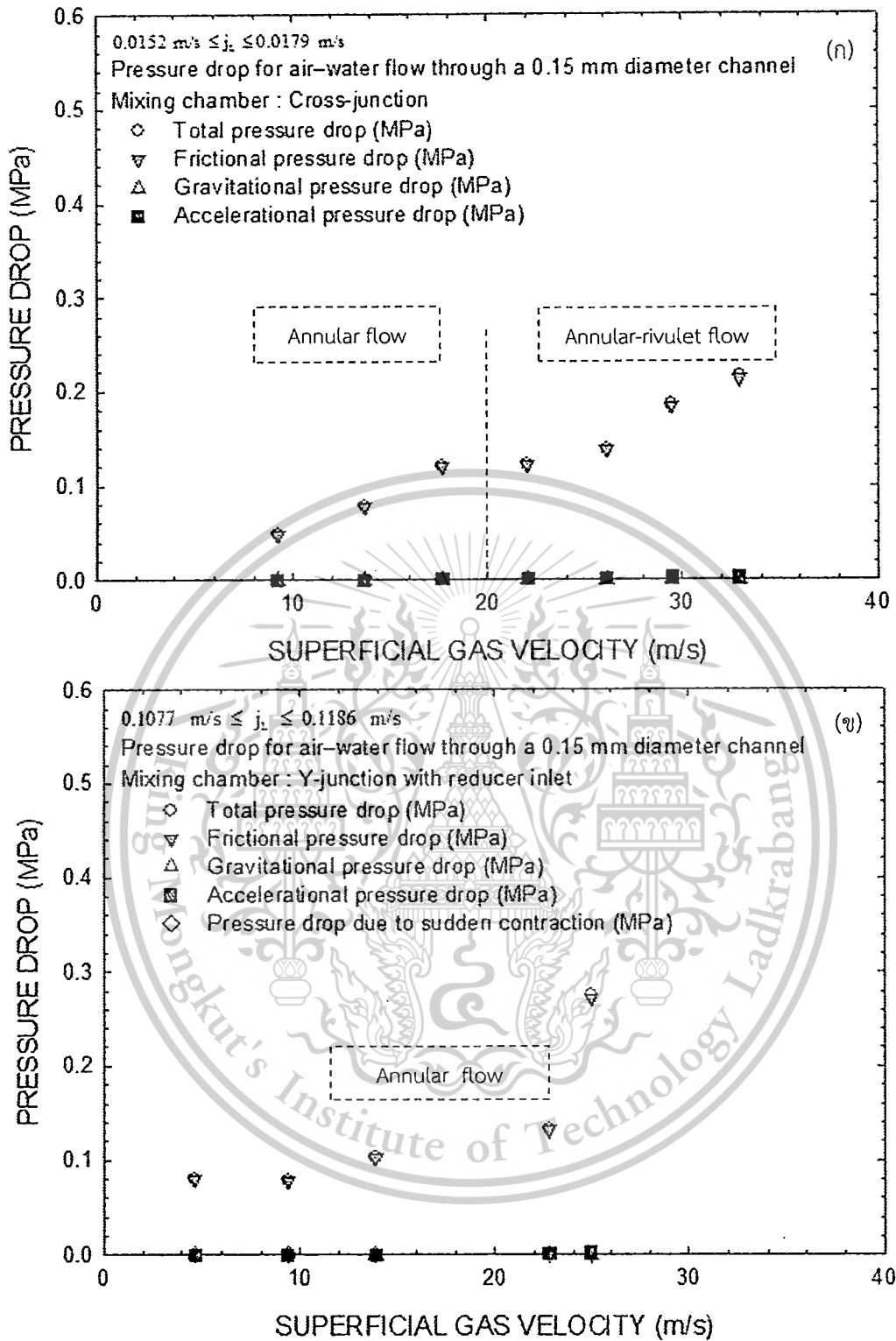
ในรูปที่ 5.35 เป็นการเปรียบเทียบความดันลดจากแรงเสียดทานสำหรับท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร พบว่าท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มีค่าความดันลดจากแรงเสียดทานมากที่สุด และในท่อไมโครเซนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มีค่าความดันลดจากแรงเสียดทานน้อยที่สุด เนื่องมาจากผลของ major loss การสูญเสียขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในยังมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ความดันลดจากแรงเสียดทานมีค่ามากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

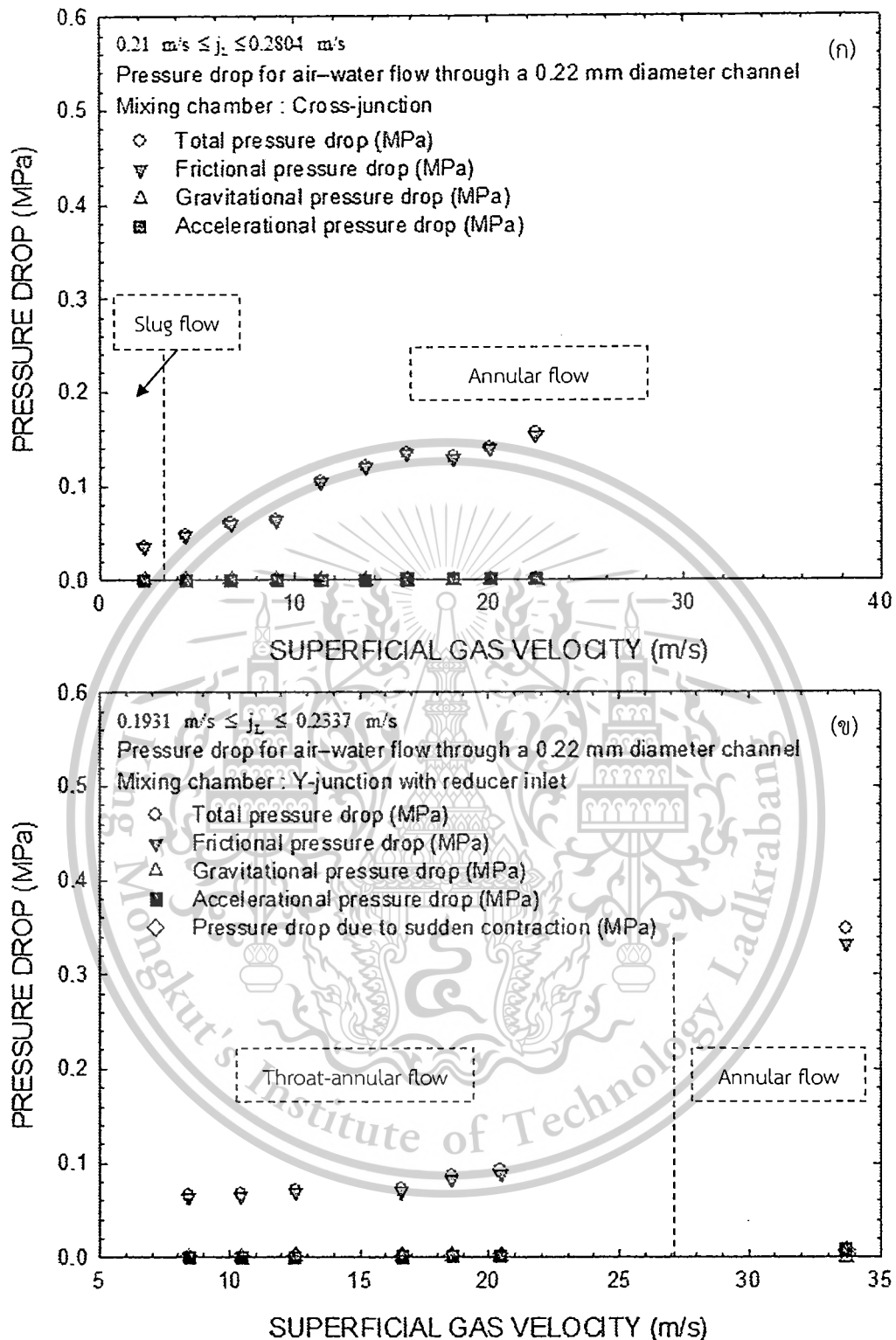


รูปที่ 5.32 ความดันลดสำหรับท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร  
 (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

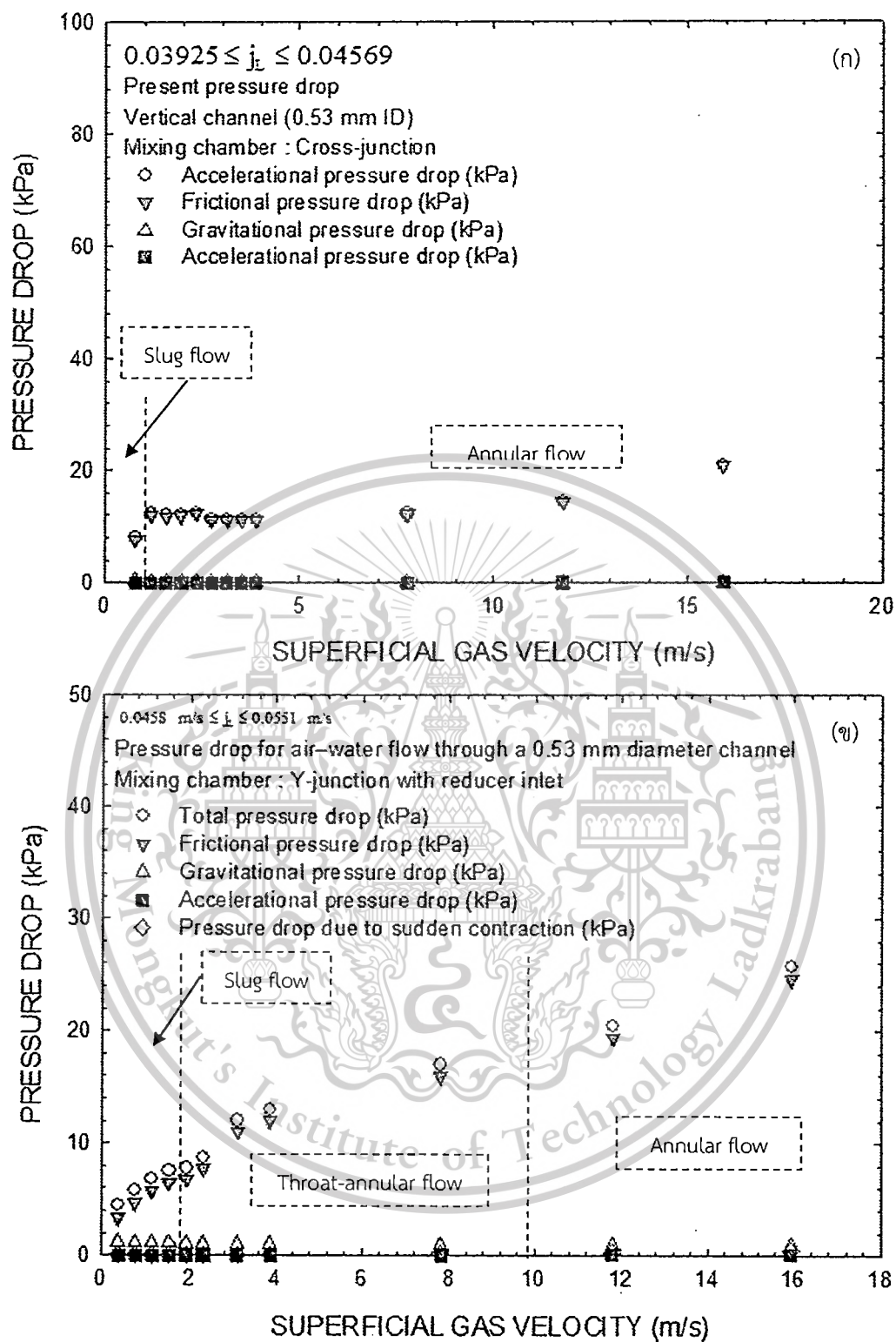
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

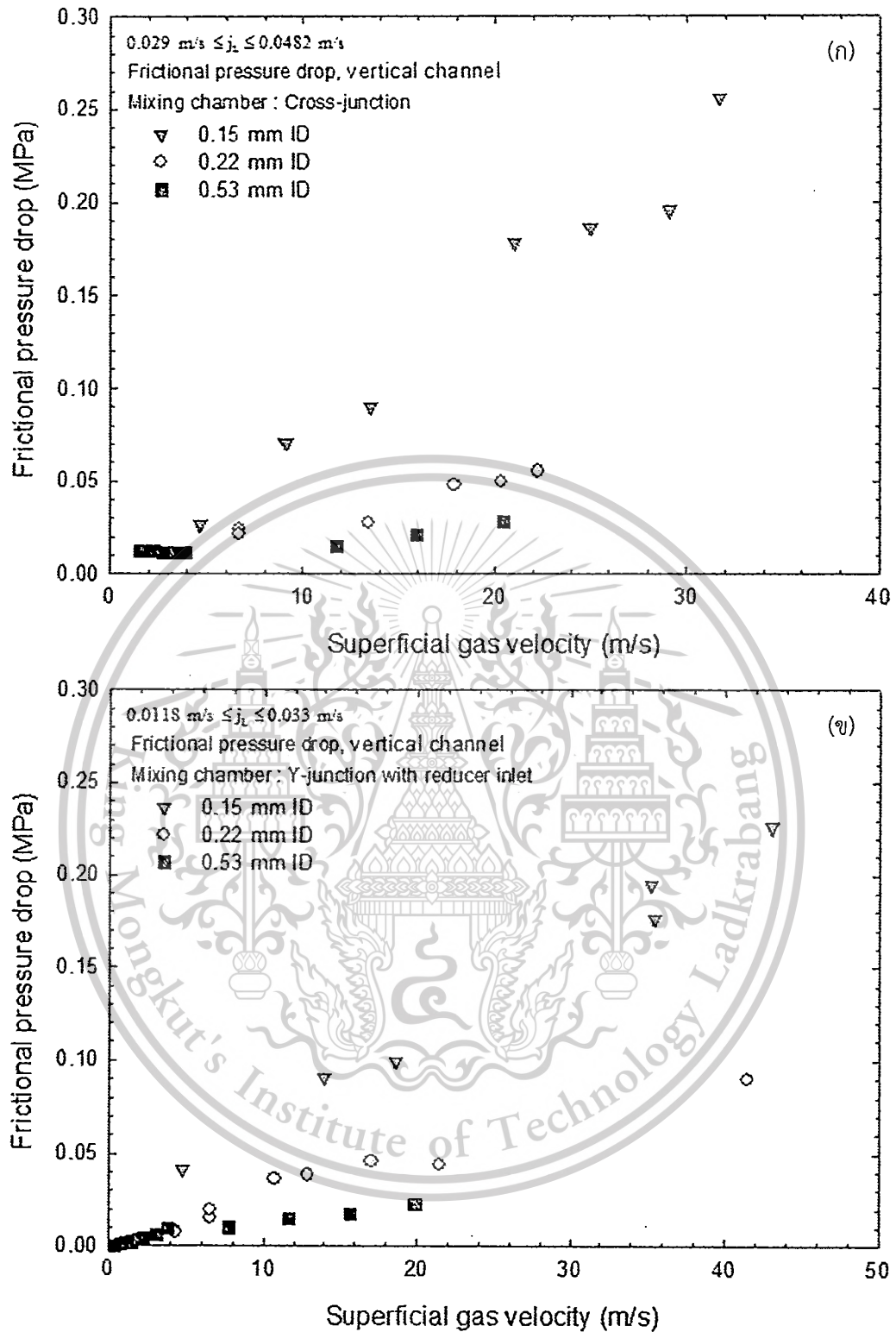
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.33 ความดันลดสำหรับท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 มิลลิเมตร  
 (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.34 ความดันลดสำหรับท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร  
(ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.35 ความดันลดจากแรงเสียดทานสำหรับท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

#### 5.4 Two-phase frictional multiplier

ความดันจากความเสียดทานของการไหลสองสถานะแก๊ส-ของเหลวมีความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์  $x$  และ two-phase frictional multiplier  $\phi_L^2$  (Lockhart Martinelli, (1949)) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (11)

$$\phi_L^2 = \frac{(dP_F/dZ)_{TP}}{(dP_F/dZ)_L} \quad (11)$$

เมื่อ  $(dP_F/dZ)_L$  คือ ความดันลดจากแรงเสียดทานต่อหน่วยความยาวของของเหลว และ  $(dP_F/dZ)_{TP}$  คือ ความดันลดจากแรงเสียดทานต่อหน่วยความยาวสองสถานะ Martinelli parameter,  $x^2$  หาได้จากสมการที่ (12)

$$x^2 = \frac{(dP_F/dZ)_L}{(dP_F/dZ)_G} \quad (12)$$

สำหรับท่อกลมเรียบสามารถนำเสนอในรูปแบบ Lockhart–Martinelli correlation ดังนี้

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{x} + \frac{1}{x^2} \quad (13)$$

เมื่อ  $\phi_L^2$  คือ two-phase frictional multiplier,  $x$  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  $\phi_L^2$  และ  $x$  ได้รับจาก

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{21(1-e^{-319D_h})}{x} + \frac{1}{x^2} \quad (14)$$

เมื่อ  $D_h$  ย่อมาจาก hydraulic diameter

เมื่อเร็ว ๆ นี้ English and Kandlikar (2006) ที่นำเสนอความสัมพันธ์ที่มีการแก้ไขบนพื้นฐาน Mishima and Hibiki's correlation (1996) ดังแสดงในสมการที่ (15)

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C(1-e^{-319D_h})}{x} + \frac{1}{x^2} \quad (15)$$

ค่า  $C$  ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไหลของแก๊สและของเหลว สำหรับข้อมูลงานในปัจจุบันการไหลสองสถานะอยู่ในภูมิภาคการไหลแบบราบเรียบ และด้วยเหตุนี้  $C = 5$  เหมาะสำหรับการใช้ในการคำนวณ

ข้อมูล two-phase frictional multiplier ที่ได้รับในงานปัจจุบันนี้ แสดงในรูปที่ 5.36-5.41 (ก), (ข) ในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber ทั้งสองแบบ พบว่าไม่สามารถทำนายได้ทั้ง 5 correlation

ในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร สำหรับ mixing chamber แบบ cross-junction พบว่าความสัมพันธ์ที่เสนอโดย English และ Kandlikar (2006) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่ดีกับรูปแบบการไหลแบบ churn flow และ annular flow และใน mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า English และ Kandlikar (2006), Mishima และ Hibiki (1996), Li และ Wu (2010) และ Zhang และคณะ (2010) สอดคล้องกับ churn flow เท่านั้น

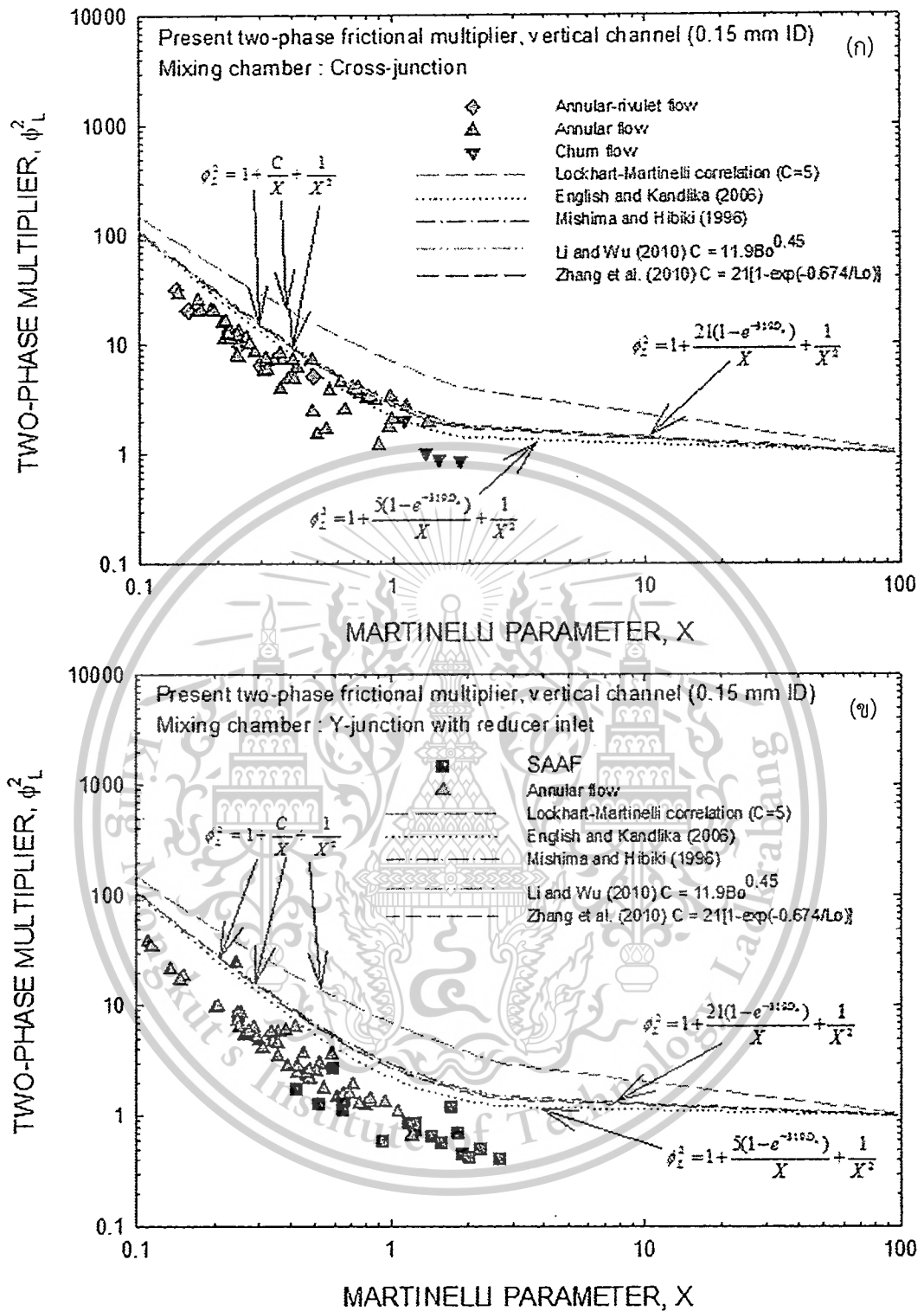
ในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร สำหรับ mixing chamber แบบ cross-junction พบว่าความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Lockhart-Martinelli (2006), Mishima และ Hibiki (1996), Li และ Wu (2010) และ Zhang และคณะ (2010) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่ดีกับรูปแบบการไหลแบบ annular flow และ English และ Kandlikar (2006), Mishima และ Hibiki (1996), Li และ Wu (2010) และ Zhang และคณะ (2010) สอดคล้องกับ throat-annular flow และใน mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า English และ Kandlikar (2006), Mishima และ Hibiki (1996), Li และ Wu (2010) และ Zhang และคณะ (2010) สอดคล้องกับ annular flow และ Mishima และ Hibiki (1996) สอดคล้องกับ churn flow และ English และ Kandlikar (2006) สอดคล้องกับ annular-rivulet flow



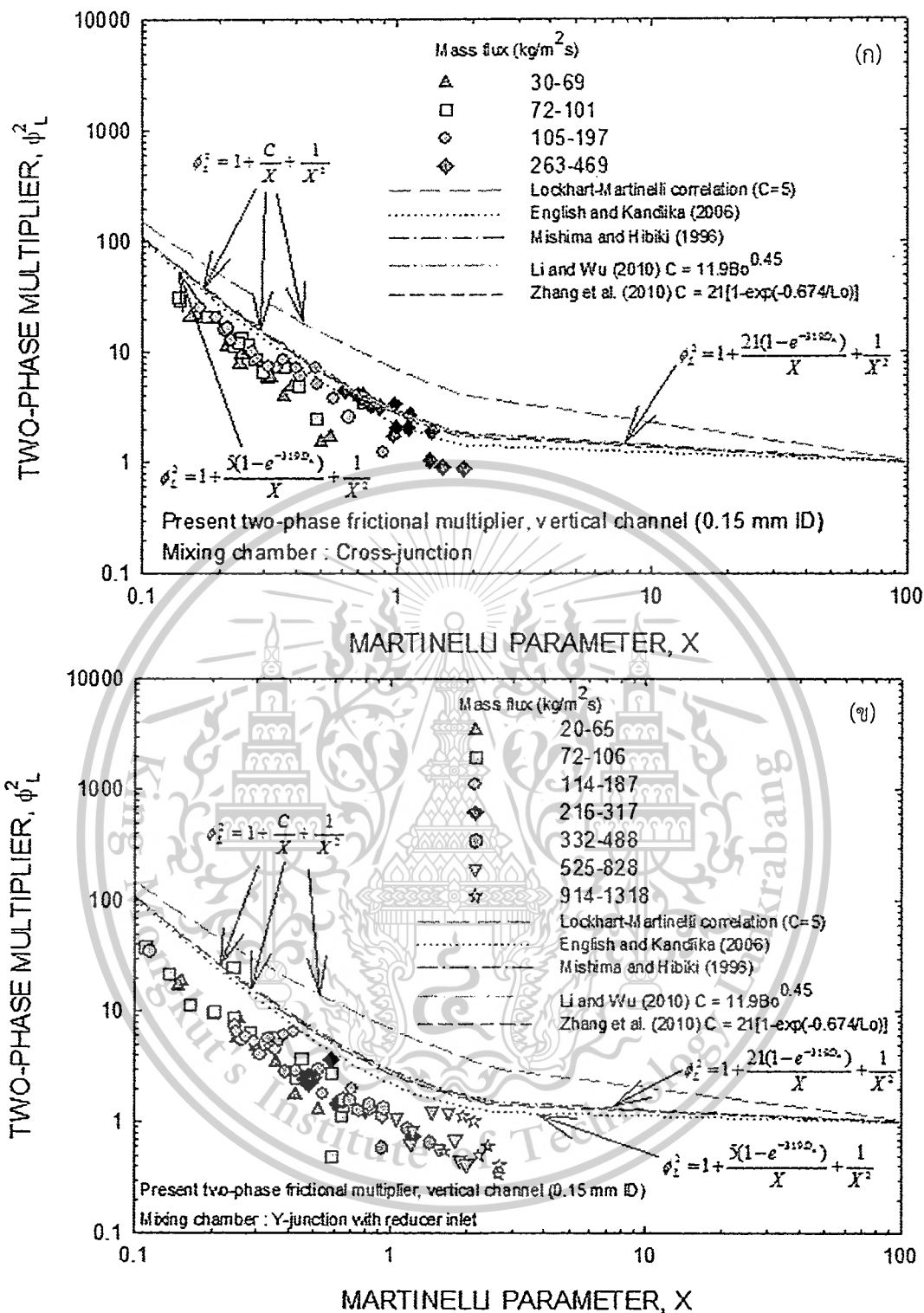
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

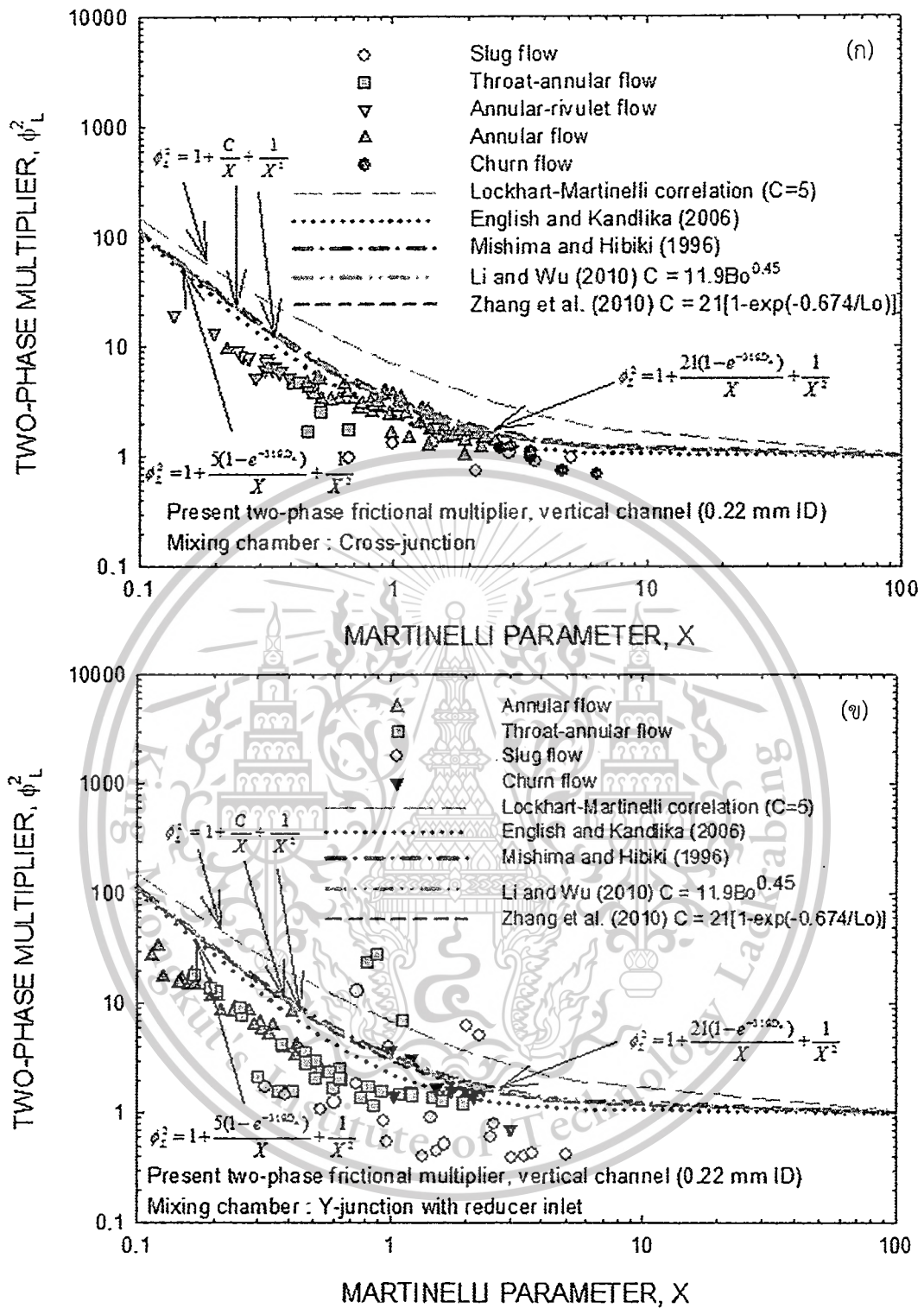
It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.



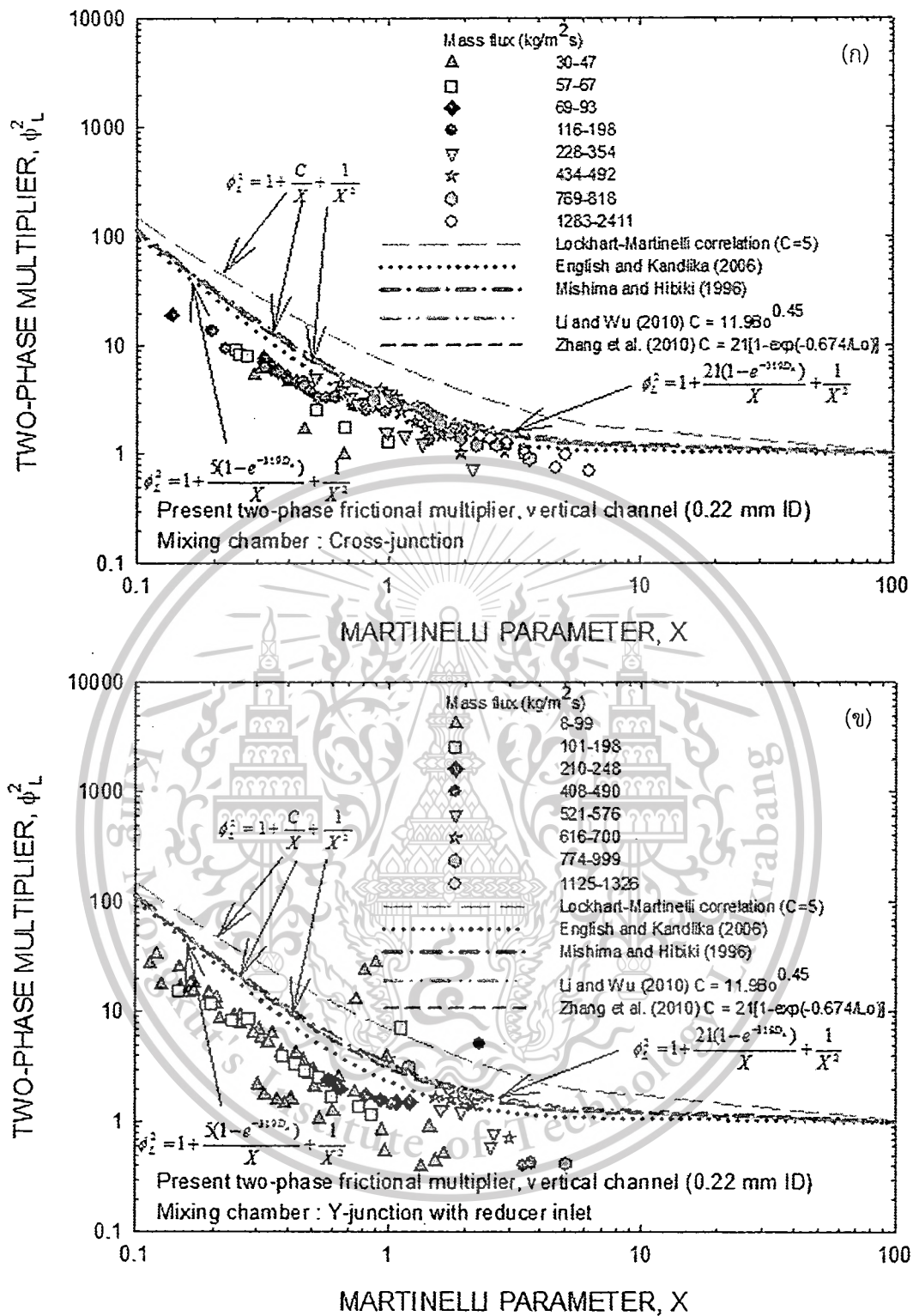
รูปที่ 5.36 Two-phase frictional multiplier ที่มีรูปแบบการไหลต่างๆสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 mm (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



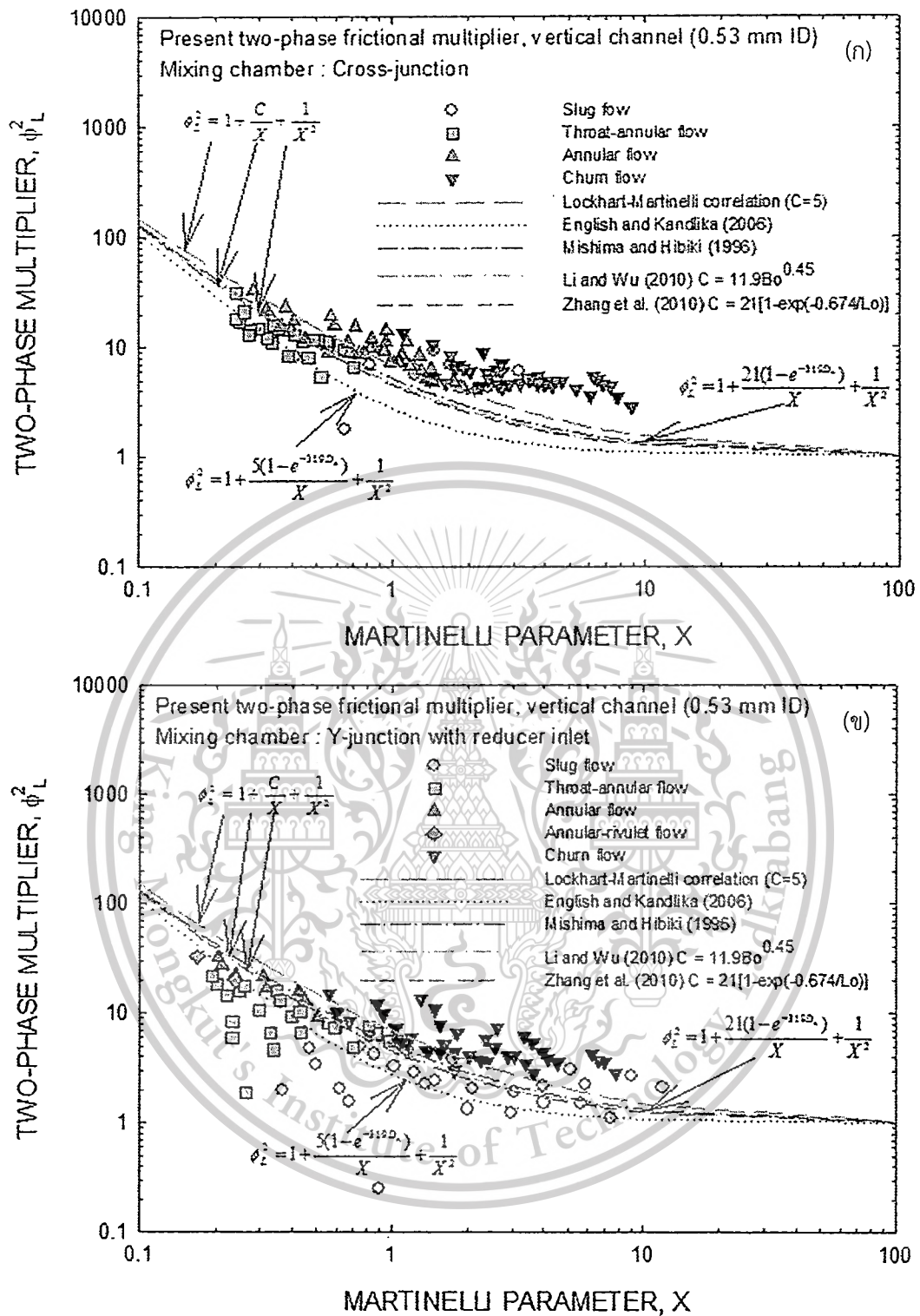
รูปที่ 5.37 Two-phase frictional multiplier ที่มี mass flux ต่างๆสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 mm (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.38 Two-phase frictional multiplier ที่มีรูปแบบการไหลต่างๆสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 mm (ก) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet



รูปที่ 5.39 Two-phase frictional multiplier ที่มี mass flux ต่างๆสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 mm (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

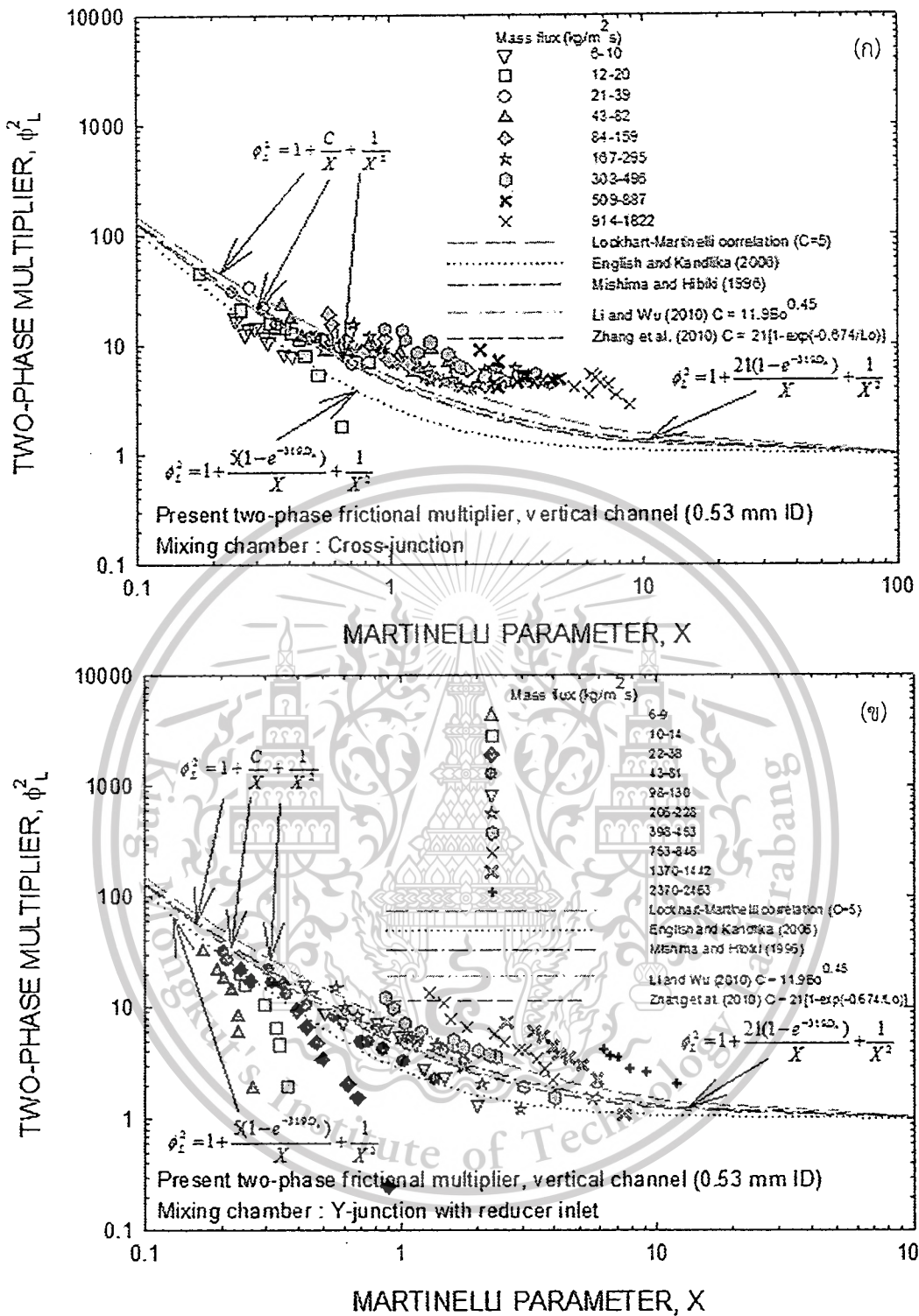


รูปที่ 5.40 Two-phase frictional multiplier ที่มีรูปแบบการไหลต่างๆสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 mm (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.41 Two-phase frictional multiplier ที่มี mass flux ต่างๆสำหรับท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.53 mm (น) Cross-junction (ข) Y-junction with reducer inlet

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของรูปแบบการไหลของการไหลสองสถานะ, ความดันลด และ Two-phase frictional multiplier ของท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15, 0.22 และ 0.53 มิลลิเมตร ทั้ง 2 mixing chamber พบว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจน

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

1. รูปแบบการไหลที่พบจากการทดลองของ mixing chamber แบบ Cross-junction ในท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวตั้งโดยที่สารไหลขึ้น ซึ่งมีความเร็วของน้ำอยู่ในช่วง 0.015221967 ถึง 0.436167907 เมตรต่อวินาที และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 3.851051599 ถึง 32.91737274 เมตรต่อวินาที พบรูปแบบการไหลดังนี้ annular flow, annular-rivulet flow และ churn flow
2. รูปแบบการไหลที่พบจากการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ในท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ยาว 104 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวตั้งโดยที่สารไหลขึ้น ซึ่งมีความเร็วของน้ำอยู่ในช่วง 0.011818743 ถึง 1.273901066 เมตรต่อวินาที และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 4.336068308 ถึง 43.08690141 เมตรต่อวินาที พบรูปแบบการไหลดังนี้ slug/annular alternating flow และ annular flow
3. รูปแบบการไหลที่พบจากการทดลองของ mixing chamber แบบ Cross-junction ในท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวตั้งโดยที่สารไหลขึ้น ซึ่งมีความเร็วของน้ำอยู่ในช่วง 0.020150221 ถึง 2.137849123 เมตรต่อวินาที และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 2.106507215 ถึง 67.20930205 เมตรต่อวินาที มีรูปแบบการไหลดังนี้ slug flow, throat-annular flow, churn flow, annular flow และ annular-rivulet flow
4. รูปแบบการไหลที่พบจากการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ในท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวตั้งโดยที่สารไหลขึ้น ซึ่งมีความเร็วของน้ำอยู่ในช่วง 0.005748134 ถึง 1.299555368 เมตรต่อวินาที และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 2.09559945 ถึง 42.64152557 เมตรต่อวินาที มีรูปแบบการไหลดังนี้ slug flow, throat-annular flow, churn flow และ annular flow
5. รูปแบบการไหลที่พบจากการทดลองของ mixing chamber แบบ Cross-junction ในท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวตั้งโดยที่สารไหลขึ้น ซึ่งมีความเร็วของน้ำอยู่ในช่วง 0.004602967 ถึง 1.81882799 เมตรต่อวินาที และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 0.750725689 ถึง 23.73295418 เมตรต่อวินาที มีรูปแบบการไหลดังนี้ slug flow, throat-annular flow, churn flow และ annular flow
6. รูปแบบการไหลที่พบจากการทดลองของ mixing chamber แบบ Y-junction with Reducer Inlet ในท่อไมโครแชนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร ที่วางตัวในแนวตั้งโดยที่สารไหลขึ้น ซึ่งมีความเร็วของน้ำอยู่ในช่วง 0.00430311 ถึง 2.467529721 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 0.380167317 ถึง 21.18651409 เมตรต่อวินาที มีรูปแบบการไหล ดังนี้ slug flow, throat-annular flow, churn flow, annular flow และ annular-rivulet flow

7. จากการเปรียบเทียบแผนภูมิรูปแบบการไหลของทั้งสอง mixing chamber ของทั้ง 3 ขนาดของท่อ ไมโครเซนแนล พบว่ามีแตกต่างกันอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากมี mixing chamber เป็นคนละชนิดกัน คือ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า ส่วนทดสอบ ซึ่ง ใน mixing chamber แบบ Cross-junction จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ ส่วน จึงทำให้รูปแบบการไหลที่ได้รับมีความเสถียรมากกว่า ดังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในผลการทดลองของ ท่อไมโครเซนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร

8. สัดส่วนช่องว่างที่ได้รับจากผลการทดลองของท่อไมโครเซนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของทั้งสอง mixing chamber และในท่อไมโครเซนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่าไม่เป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตามในท่อไมโครเซนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction และในท่อไมโครเซนแนลที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของทั้งสอง mixing chamber ถูกพบว่าเป็นเชิงเส้น

9. จากการเปรียบเทียบความดันลดจากแรงเสียดทานทั้ง 3 ท่อ ของทั้งสอง mixing chamber พบว่า ท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาดเล็ก ส่งผลให้ความดันลดจากแรงเสียดทานมีค่ามากขึ้น เนื่องจาก Major Loss

10. ข้อมูล two-phase frictional multiplier ที่ได้จากการทดลองของท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber ทั้งสองแบบ พบว่าไม่สามารถทำนายได้ทั้ง 5 correlation

11. ข้อมูล two-phase frictional multiplier ที่ได้จากการทดลองของท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร สำหรับ mixing chamber แบบ Cross-junction พบว่าความสัมพันธ์ที่เสนอ โดย English และ Kandlikar แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่ดีกับรูปแบบการไหลแบบ churn flow และ annular flow และใน mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า English และ Kandlikar, Mishima และ Hibiki, Li และ Wu และ Zhang และคณะ สอดคล้องกับ churn flow เท่านั้น

12. ข้อมูล two-phase frictional multiplier ที่ได้จากการทดลองของท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร สำหรับ mixing chamber แบบ Cross-junction พบว่าความสัมพันธ์ที่เสนอ โดย Lockhart-Martinelli, Mishima และ Hibiki, Li และ Wu และ Zhang และคณะ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่ดีกับรูปแบบการไหลแบบ annular flow และ English และ Kandlikar, Mishima และ Hibiki, Li และ Wu และ Zhang และคณะ สอดคล้องกับ throat-annular flow และใน mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet พบว่า English และ Kandlikar, Mishima และ Hibiki, Li และ Wu และ Zhang และคณะ สอดคล้องกับ annular flow และ Mishima และ Hibiki สอดคล้องกับ churn flow และ English และ Kandlikar สอดคล้องกับ annular-rivulet flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

1. ควรออกแบบส่วนการทดสอบให้สามารถศึกษารูปแบบการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนไปด้วยกัน
2. ควรใช้ของไหลในอุณหภูมิที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อรูปแบบการไหล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บรรณานุกรม

- A. Serizawa, Z. Feng, Z. Kawara, 2002. Two-phase flow in micro-channels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 26 703–714.
- A. Kawahara, P.M.-Y. Chung, M. Kawaji, 2002. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *Int. J. Multiphase Flow* 28 1411–1435.
- D. Chisholm, 1967. A theoretical basis for the Lockhart–Martinelli correlation for two-phase flow, *Int. J. Heat Mass Transfer* 10 1767–1778.
- D. Chisholm, 1983. *Two-phase Flow in Pipeline and Heat Exchangers*, Pitman Press Ltd., Bath, England.
- Hong-Wei Li, Yun-Long Zhou, Yan-Dong Hou, Bin Sun, Yue Yang, 2014. Flow pattern map and time-frequency spectrum characteristics of nitrogen-water two-phase flow in small vertical upward noncircular channels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 54 47–60.
- K.A. Triplett, S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, D.L. Sadowski, 1999a. Gas-liquid two-phase flow in micro channels Part I: two-phase flow patterns, *Int. J. Multiphase Flow* 25 377–394.
- K.A. Triplett, S.M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, A. LeMouel, B.N. McCord, 1999b. Gas-liquid two-phase flow in micro channels Part II: void fraction and pressure drop, *Int. J. Multiphase flow* 25 395–410.
- K. Mishima, T. Hibiki, 1996. Some characteristics of air–water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *Int. J. Multiphase Flow* 22 703–712.
- M. Kawaji, K. Mori and D. Bolintineanu, 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)
- N.J. English, S.G. Kandlikar, 2006. An experimental investigation into the effect of surfactants on air–water two-phase flow in minichannels, *Heat Transfer Eng.* 27 99–109.
- O. Baker, 1954. Design of pipe lines for simultaneous flow of oil and gas, *Oil Gas J.* 26.
- R.W. Lockhart, R.C. Martinelli, 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.* 45 39–48.
- S. Garimella, J.D. Killion, J.W. Coleman, 2002. An experimentally validated model for two-phase pressure drop in the intermittent flow regime for circular microchannels, *J. Fluid Eng.* 124 205–214.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- S. 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.
- S. 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.
- S. Saisorn, S. Wongwises, 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.
- S. Saisorn, S. Wongwises, 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.
- S. Waelchli, P. Rudolf von Rohr, 2006. Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors, *Int. J. Multiphase Flow* 32 791-806.
- Wei Li, Zan Wu, 2010. A general correlation for adiabatic two-phase pressure drop in micro/mini-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 2732-2739.
- W. Zhang, T. Hibiki, K. Mishima, 2010. Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 453-465.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กิจกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. การหาค่าความเร็วของน้ำ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ  $\dot{Q}_L$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว โดยคำนวณได้จากสมการ

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

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก(2)ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ

$$\dot{Q}_L = \frac{2.33333E - 07 \text{ kg/s}}{998 \text{ kg/m}^3} = 2.33801E - 10 \text{ m}^3/\text{s}$$

นำ  $\dot{Q}_L$  แทนใน (1) จะได้

$$j_L = \frac{2.33801E - 10 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi}{4} (0.00015 \text{ m})^2} = 0.013230427 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. การหาค่าความเร็วของอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการ

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

เมื่อ  $\dot{Q}_G$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส โดยคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ

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

$L_{\text{view}}$  คือ ระยะทางจากทางเข้าท่อถึงจุดถ่ายรูปรูป

$L$  คือ ความยาวท่อทั้งหมด

$\dot{Q}_{\text{STP}}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ปรับเทียบค่าแล้ว

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก(4)ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ

$$\dot{Q}_G = \frac{(101325 \text{ Pa})(9.86014E - 08 \text{ m}^3/\text{s})}{\left[ 143075 \text{ Pa} - (143075 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa}) \frac{0.059 \text{ m}}{0.104 \text{ m}} \right]}$$

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

นำ  $\dot{Q}_G$  แทนใน (3) จะได้

$$j_G = \frac{8.3682E - 08 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi}{4} (0.00015 \text{ m})^2} = 4.735434858 \text{ m/s}$$

สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของน้ำสามารถหาได้จากสมการ

$$f = \frac{\left[ P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2) - \rho g Z_2 - \frac{\rho k_e V_2^2}{2} \right] [2D]}{L \rho V_2^2} \quad (5)$$

เมื่อ

$f$  คือ ปัจจัยแรงเสียดทานของน้ำ

$P_1$  คือ ความดันที่วัดได้ที่ค่าความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa)

$P_2$  คือ ความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร,  $\text{kg/m}^3$ )

$V_1$  คือ ความเร็วของน้ำในท่อสแตนเลส (เมตรต่อวินาที,  $\text{m/s}$ )

$V_2$  คือ ความเร็วของน้ำในท่อไมโครแซนเนล (เมตรต่อวินาที,  $\text{m/s}$ )

$g$  คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง,  $\text{m/s}^2$ )

$Z_2$  คือ ความยาวของท่อไมโครแซนเนลและสแตนเลส (เมตร,  $\text{m}$ )

$k_e$  คือ Contraction coefficient = 0.475

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไมโครแซนเนล (เมตร,  $\text{m}$ )

$L$  คือ ความยาวของท่อไมโครแซนเนล (เมตร,  $\text{m}$ )

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก (5) จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานเท่ากับ

$$f = \frac{\left[ \begin{array}{l} 138325 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa} \\ + \frac{998 \text{ kg/m}^3}{2} (0.021008027^2 \text{ m/s} - 0.233422525^2 \text{ m/s}) \\ - 998 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.144 \text{ m} \\ \frac{998 \text{ kg/m}^3 \times 0.475 \times 0.233422525^2 \text{ m/s}}{2} \end{array} \right] [2 \times 0.00015 \text{ m}]}{0.104 \text{ m} \times 998 \text{ kg/m}^3 \times 0.233422525^2 \text{ m/s}}$$

$$f_{\text{exp}} = 1.885884752$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกัรนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของน้ำทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการ

$$f_{\text{theory}} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (6)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V_2 D}{\mu} \quad (7)$$

$$\mu = a10^{(b/(T-c))} \quad (8)$$

เมื่อ

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

b คือ ค่าคงที่เท่ากับ  $247.8 \text{ K}$  (เคลวิน, K)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน, K)

c คือ  $140$  (เคลวิน, K)

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก(8)จะได้

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

$$\mu = 0.000852617 \text{ N.s/m}^2$$

นำ  $\mu$  แทนใน (7) จะได้

$$\text{Re} = \frac{998 \text{ kg/m}^3 \times 0.233422525^2 \text{ m/s} \times 0.00015 \text{ m}}{0.000852617 \text{ N.s/m}^2}$$

$$\text{Re} = 40.98365336$$

นำ Re แทนใน (6) จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานทางทฤษฎีเท่ากับ

$$f_{\text{theory}} = \frac{64}{40.98365336} = 1.561598217$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 1 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.29E-06	3.00E-01	0.299936772	0.000917	48.95418224	1.274053	1.307345
8.392E-06	4.76E-01	0.475831129	0.000917	77.66278089	0.785214	0.824076
1.171E-05	6.64E-01	0.66371907	0.000913	108.7905594	0.544021	0.588286
1.332E-05	7.55E-01	0.755199017	0.000915	123.5223248	0.480459	0.518125
1.431E-05	8.11E-01	0.811229121	0.000919	132.1230482	0.472445	0.484397
1.608E-05	9.12E-01	0.911615023	0.000917	148.7892521	0.422979	0.430139
1.807E-05	1.02E+00	1.024731829	0.000917	167.2516124	0.367426	0.382657
2.013E-05	1.14E+00	1.141647541	0.000917	186.3340112	0.332904	0.343469
2.614E-05	1.48E+00	1.482400729	0.000919	241.4352465	0.216869	0.265081
2.512E-05	1.42E+00	1.42422773	0.000917	232.4553387	0.26062	0.275322
2.668E-05	1.51E+00	1.512641239	0.000919	246.3604499	0.249861	0.259782
2.965E-05	1.68E+00	1.681366701	0.000921	273.2570498	0.224712	0.234212
3.228E-05	1.83E+00	1.830114967	0.000919	298.0666763	0.203785	0.214717
3.386E-05	1.92E+00	1.920181422	0.000921	312.0694075	0.19797	0.205083
3.584E-05	2.03E+00	2.03221257	0.000921	330.2767986	0.18593	0.193777
3.716E-05	2.11E+00	2.107129062	0.000923	341.7219412	0.183057	0.187287
4.066E-05	2.31E+00	2.305341922	0.000923	373.8669505	0.164971	0.171184
4.252E-05	2.41E+00	2.411231195	0.000925	390.2045135	0.158935	0.164017

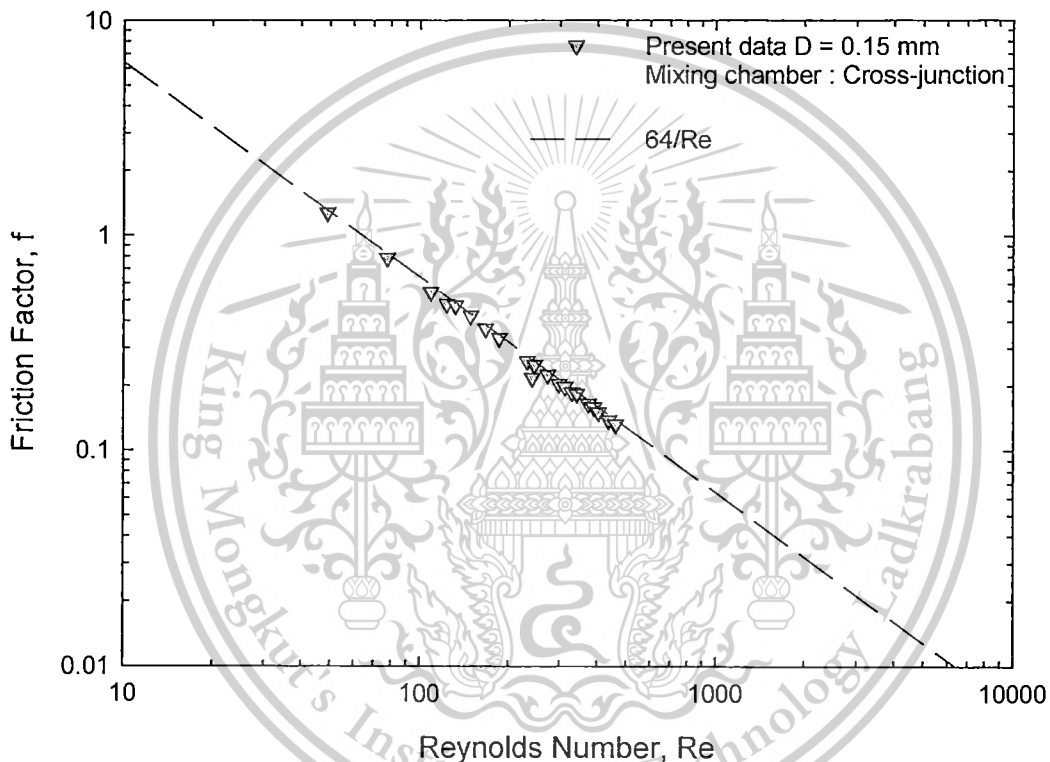
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
4.397E-05	2.49E+00	2.493126761	0.000925	403.4575021	0.150044	0.158629
4.761E-05	2.70E+00	2.699424443	0.000925	436.8422256	0.138212	0.146506
5.023E-05	2.85E+00	2.848277865	0.000925	460.9308642	0.131995	0.138849



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

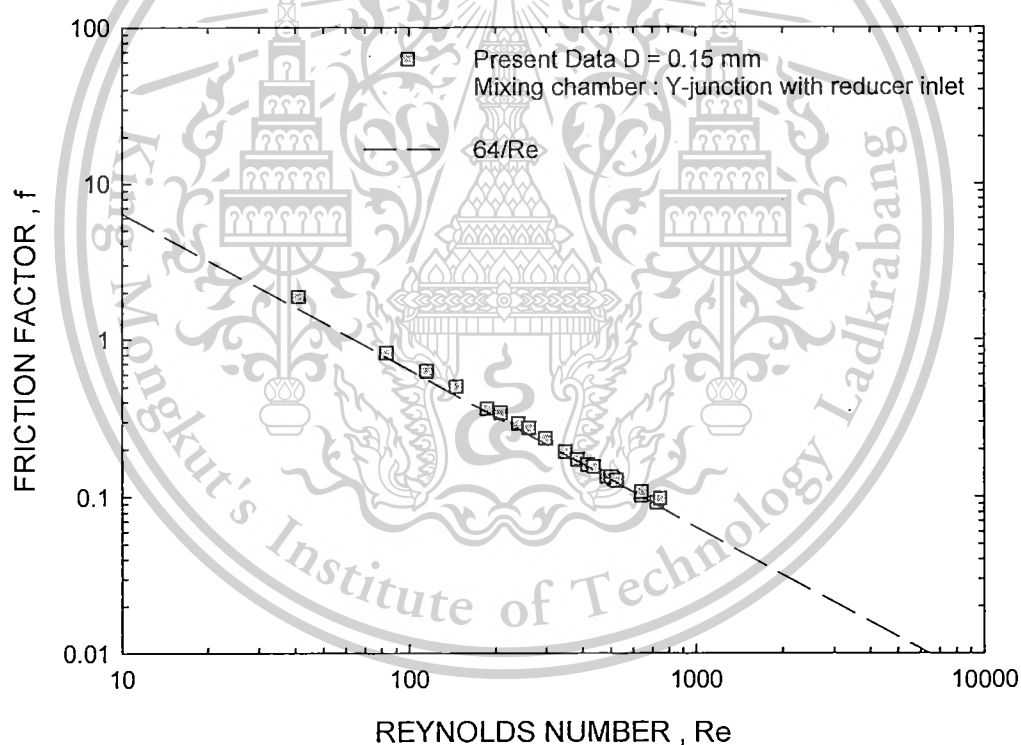
ตารางที่ 3 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
9.83333E-07	0.005018	0.0557568	0.005018	9.74963105	8.681832	6.564351
4.11667E-06	0.021008	0.2334225	0.021008	40.98365336	1.885885	1.561598
8.36667E-06	0.042696	0.4744053	0.042696	83.29471249	0.82419	0.768356
1.15167E-05	0.058771	0.6530161	0.058771	114.889148	0.630556	0.557059
1.46167E-05	0.074591	0.8287917	0.074591	145.8144469	0.503213	0.438914
0.00001875	0.095684	1.0631593	0.095684	186.6664373	0.36443	0.342858
2.08833E-05	0.106571	1.1841232	0.106571	207.9049298	0.34181	0.307833
2.40667E-05	0.122816	1.364624	0.122816	239.5967427	0.294095	0.267115
2.62167E-05	0.133788	1.4865329	0.133788	261.0011608	0.274318	0.24521
0.0000298	0.152074	1.6897145	0.152074	297.2819054	0.235625	0.215284
0.00003485	0.177845	1.9760587	0.177845	347.6602149	0.193553	0.184088
3.83167E-05	0.195536	2.172625	0.195536	382.2433448	0.173067	0.167433
4.15167E-05	0.211866	2.3540709	0.211866	415.0122516	0.159881	0.154212
0.0000435	0.221988	2.4665295	0.221988	435.7254343	0.155304	0.146881
4.83663E-05	0.246821	2.7424597	0.000847	484.4699548	0.134347	0.132103
5.11833E-05	0.261197	2.9021886	0.000849	511.6429645	0.12952	0.125087



ตารางที่ 4 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.01167E-05	0.255753	2.8417	0.000849	500.9790936	0.133794	0.12775
5.24333E-05	0.267575	2.9730589	0.000851	523.0686171	0.127407	0.122355
6.39333E-05	0.326262	3.6251284	0.000851	637.7912318	0.102022	0.100346
0.00006415	0.327367	3.6374138	0.000851	639.9526724	0.107756	0.100007
7.28333E-05	0.37168	4.1297735	0.000853	725.0937099	0.092129	0.088264
7.48833E-05	0.382141	4.2460119	0.000853	745.502526	0.097815	0.085848



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

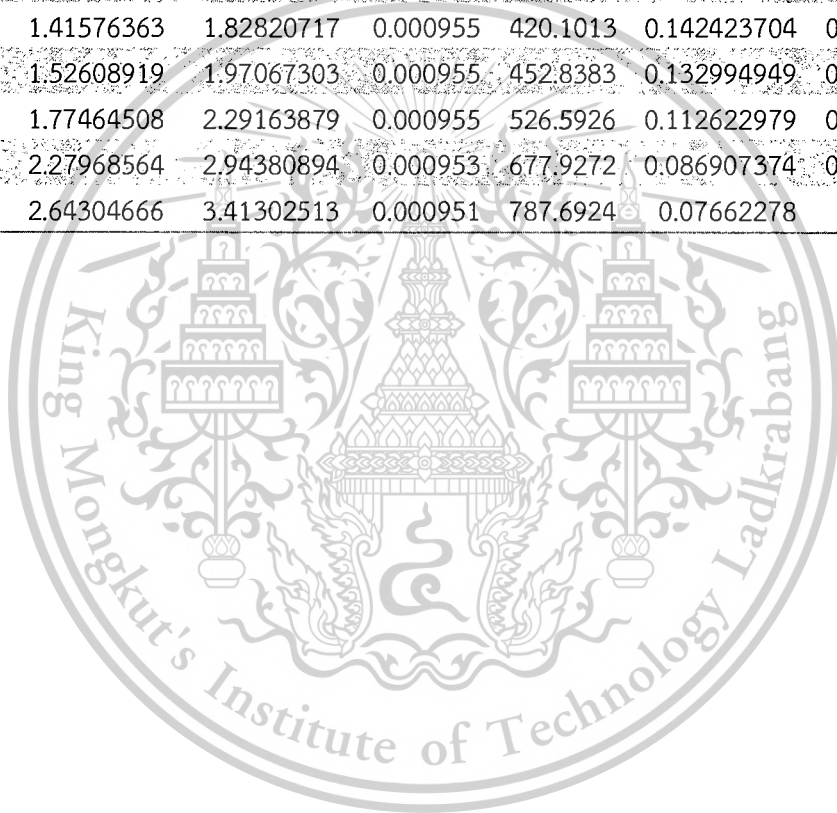
สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 5 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.365E-05	0.27870082	0.35989259	0.000974	81.08627	0.694100685	0.789283
2.696E-05	0.55023453	0.71053013	0.000962	162.2071	0.353358914	0.394557
3.759E-05	0.76724115	0.99075562	0.000958	227.1691	0.240845884	0.281728
4.88E-05	0.99609845	1.28628416	0.000923	305.9497	0.204412548	0.209185
5.902E-05	1.20483869	1.55583509	0.000958	356.7354	0.17829402	0.179405
6.936E-05	1.41576363	1.82820717	0.000955	420.1013	0.142423704	0.152344
7.476E-05	1.52608919	1.97067303	0.000955	452.8383	0.132994949	0.141331
8.694E-05	1.77464508	2.29163879	0.000955	526.5926	0.112622979	0.121536
0.0001117	2.27968564	2.94380894	0.000953	677.9272	0.086907374	0.094405
0.0001295	2.64304666	3.41302513	0.000951	787.6924	0.07662278	0.08125



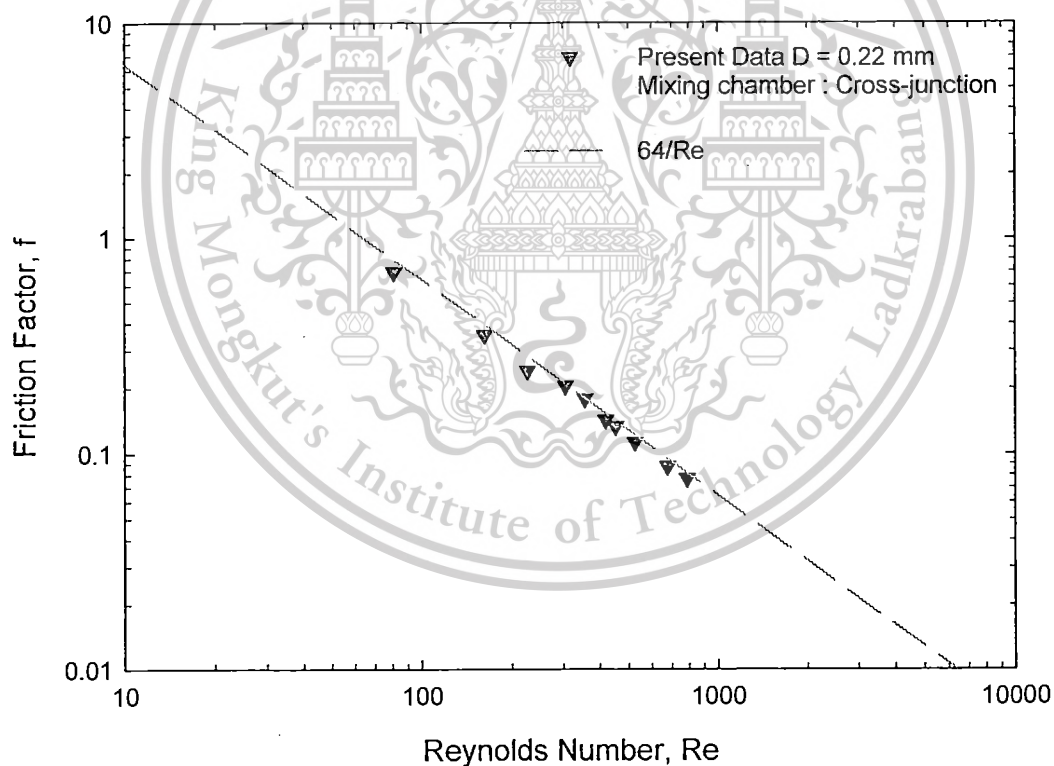
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 6 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

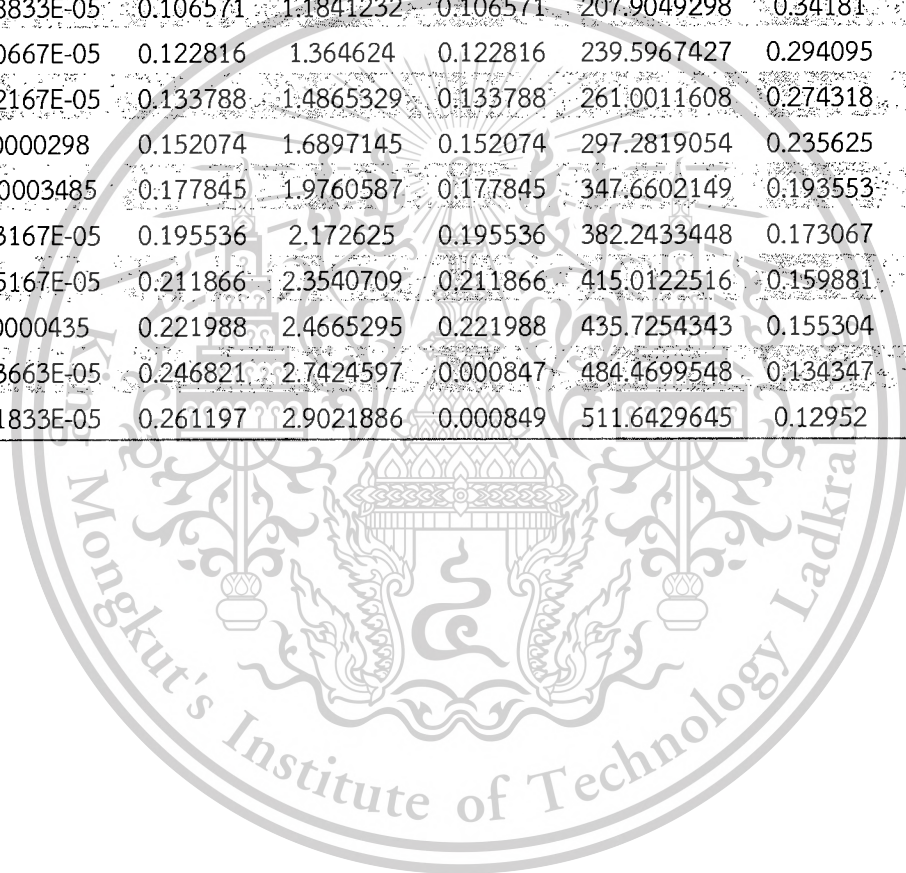
$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.365E-05	0.27870082	0.35989259	0.000974	81.08627	0.694100685	0.789283
2.696E-05	0.55023453	0.71053013	0.000962	162.2071	0.353358914	0.394557
3.759E-05	0.76724115	0.99075562	0.000958	227.1691	0.240845884	0.281728
4.88E-05	0.99609845	1.28628416	0.000923	305.9497	0.204412548	0.209185
5.902E-05	1.20483869	1.55583509	0.000958	356.7354	0.17829402	0.179405
6.936E-05	1.41576363	1.82820717	0.000955	420.1013	0.142423704	0.152344
7.476E-05	1.52608919	1.97067303	0.000955	452.8383	0.132994949	0.141331
8.694E-05	1.77464508	2.29163879	0.000955	526.5926	0.112622979	0.121536
0.0001117	2.27968564	2.94380894	0.000953	677.9272	0.086907374	0.094405
0.0001295	2.64304666	3.41302513	0.000951	787.6924	0.07662278	0.08125



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ 7 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
9.83333E-07	0.005018	0.0557568	0.005018	9.74963105	8.681832	6.564351
4.11667E-06	0.021008	0.2334225	0.021008	40.98365336	1.885885	1.561598
8.36667E-06	0.042696	0.4744053	0.042696	83.29471249	0.82419	0.768356
1.15167E-05	0.058771	0.6530161	0.058771	114.889148	0.630556	0.557059
1.46167E-05	0.074591	0.8287917	0.074591	145.8144469	0.503213	0.438914
0.00001875	0.095684	1.0631593	0.095684	186.6664373	0.36443	0.342858
2.08833E-05	0.106571	1.1841232	0.106571	207.9049298	0.34181	0.307833
2.40667E-05	0.122816	1.364624	0.122816	239.5967427	0.294095	0.267115
2.62167E-05	0.133788	1.4865329	0.133788	261.0011608	0.274318	0.24521
0.0000298	0.152074	1.6897145	0.152074	297.2819054	0.235625	0.215284
0.00003485	0.177845	1.9760587	0.177845	347.6602149	0.193553	0.184088
3.83167E-05	0.195536	2.172625	0.195536	382.2433448	0.173067	0.167433
4.15167E-05	0.211866	2.3540709	0.211866	415.0122516	0.159881	0.154212
0.0000435	0.221988	2.4665295	0.221988	435.7254343	0.155304	0.146881
4.83663E-05	0.246821	2.7424597	0.000847	484.4699548	0.134347	0.132103
5.11833E-05	0.261197	2.9021886	0.000849	511.6429645	0.12952	0.125087



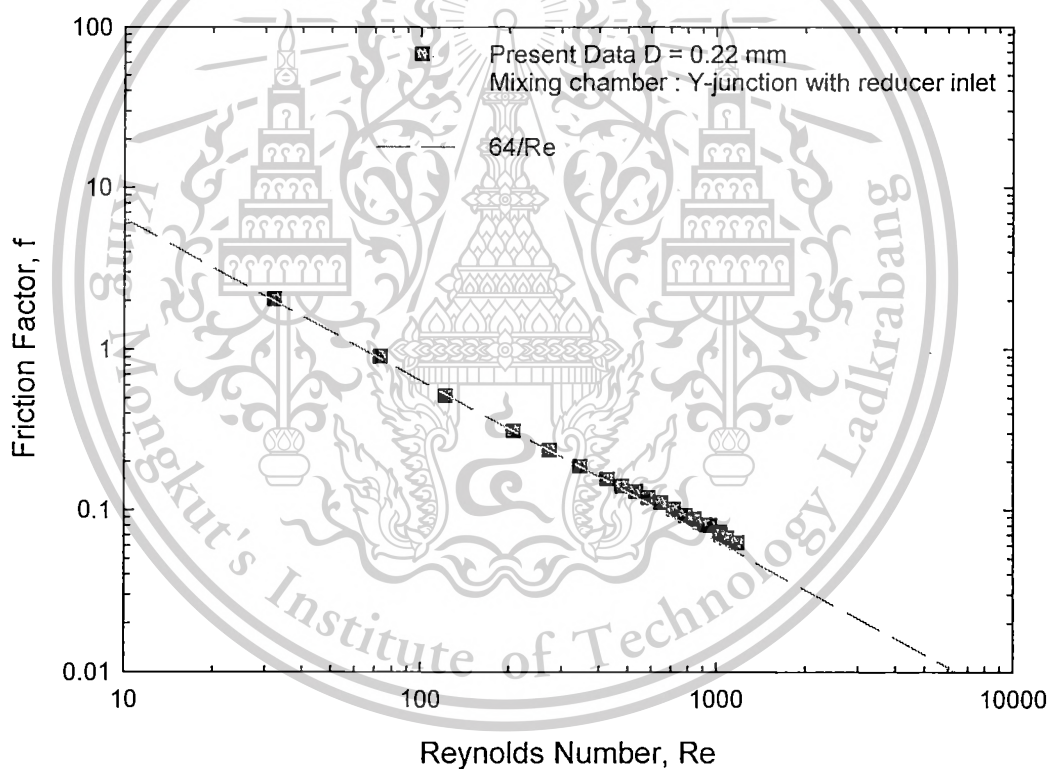
สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 8 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุม ความดัน 0-10 บาร์

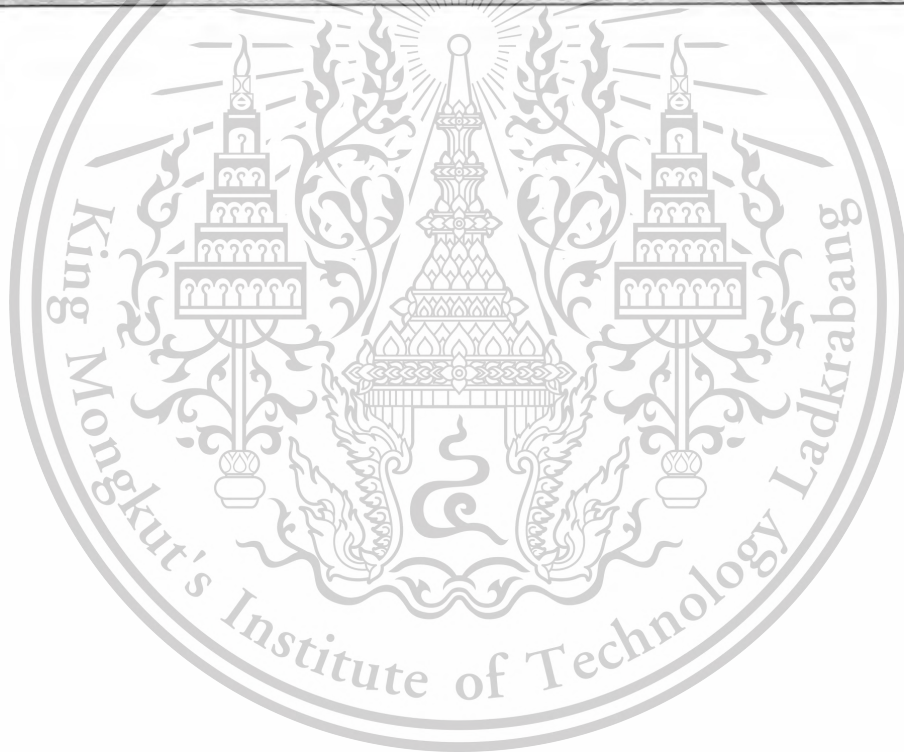
$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.01167E-05	0.255753	2.8417	0.000849	500.9790936	0.133794	0.12775
5.24333E-05	0.267575	2.9730589	0.000851	523.0686171	0.127407	0.122355
6.39333E-05	0.326262	3.6251284	0.000851	637.7912318	0.102022	0.100346
0.00006415	0.327367	3.6374138	0.000851	639.9526724	0.107756	0.100007
7.28333E-05	0.37168	4.1297735	0.000853	725.0937099	0.092129	0.088264
7.48833E-05	0.382141	4.2460119	0.000853	745.502526	0.097815	0.085848



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ 9 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
2.219E-05	0.113247726	0.100790073	0.000931	57.26172	1.050018717	1.117675
5.453E-05	0.278292571	0.247679398	0.000933	140.4119	0.404420331	0.455802
9.053E-05	0.462006493	0.411184134	0.000931	233.6054	0.245963985	0.273966
0.0002199	1.121973243	0.998552192	0.000923	572.1858	0.102643974	0.111852
0.0002776	1.416425836	1.260613951	0.000915	728.5356	0.078188004	0.087847
0.0002936	1.498076468	1.333282723	0.000913	772.1715	0.073342758	0.082883
0.0003465	1.767991344	1.573506002	0.000913	911.297	0.062204263	0.07023
0.0005149	2.627704458	2.338647613	0.000909	1360.188	0.040577068	0.047052
0.0006593	3.364643939	2.994521128	0.000908	1745.344	0.031511771	0.036669



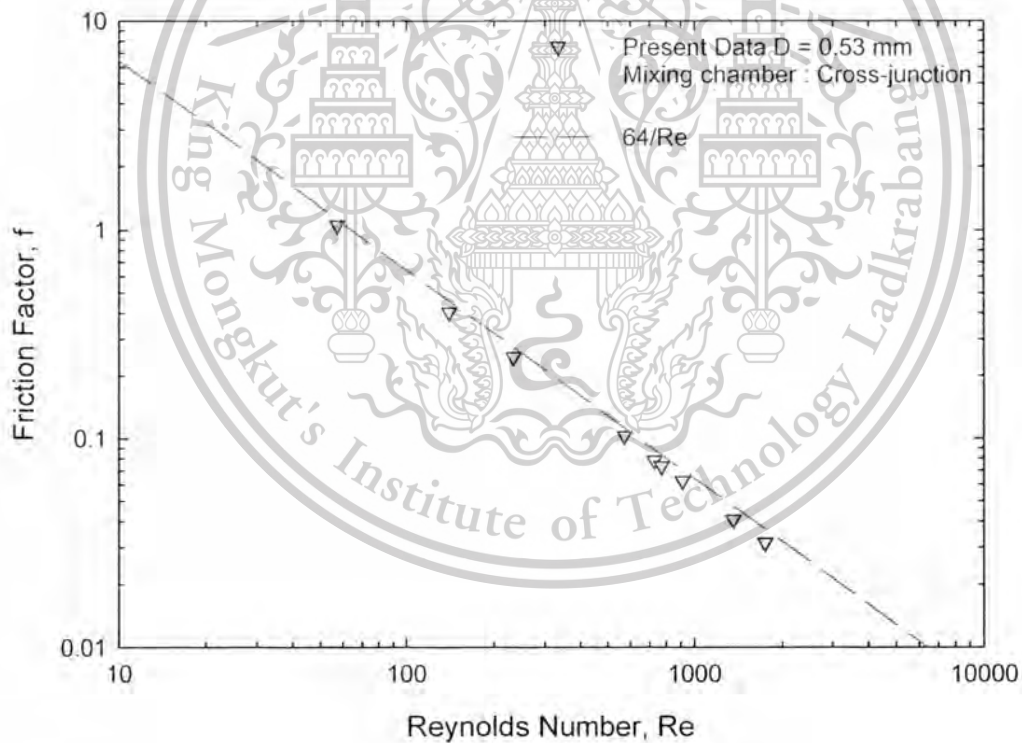
สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ทรัพย์สินใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

bidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 10 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
2.219E-05	0.113247726	0.100790073	0.000931	57.26172	1.050018717	1.117675
5.453E-05	0.278292571	0.247679398	0.000933	140.4119	0.404420331	0.455802
9.053E-05	0.462006493	0.411184134	0.000931	233.6054	0.245963985	0.273966
0.0002199	1.121973243	0.998552192	0.000923	572.1858	0.102643974	0.111852
0.0002776	1.416425836	1.260613951	0.000915	728.5356	0.078188004	0.087847
0.0002936	1.498076468	1.333282723	0.000913	772.1715	0.073342758	0.082883
0.0003465	1.767991344	1.573506002	0.000913	911.297	0.062204263	0.07023
0.0005149	2.627704458	2.338647613	0.000909	1360.188	0.040577068	0.047052
0.0006593	3.364643939	2.994521128	0.000908	1745.344	0.031511771	0.036669



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

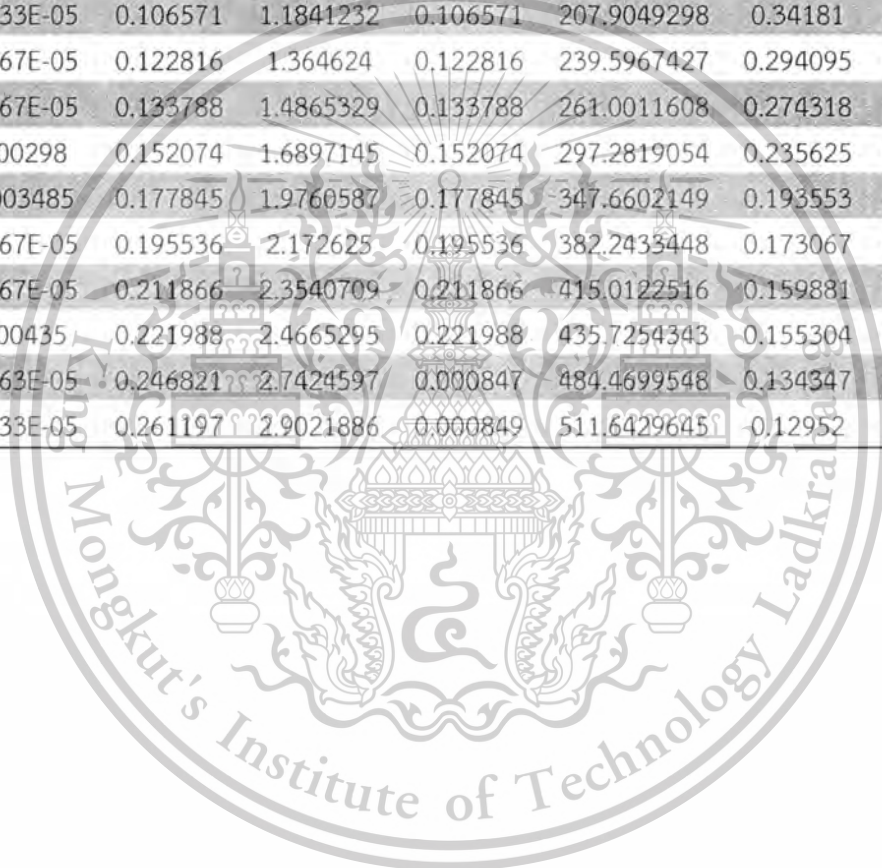
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 11 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
9.83333E-07	0.005018	0.0557568	0.005018	9.74963105	8.681832	6.564351
4.11667E-06	0.021008	0.2334225	0.021008	40.98365336	1.885885	1.561598
8.36667E-06	0.042696	0.4744053	0.042696	83.29471249	0.82419	0.768356
1.15167E-05	0.058771	0.6530161	0.058771	114.889148	0.630556	0.557059
1.46167E-05	0.074591	0.8287917	0.074591	145.8144469	0.503213	0.438914
0.00001875	0.095684	1.0631593	0.095684	186.6664373	0.36443	0.342858
2.08833E-05	0.106571	1.1841232	0.106571	207.9049298	0.34181	0.307833
2.40667E-05	0.122816	1.364624	0.122816	239.5967427	0.294095	0.267115
2.62167E-05	0.133788	1.4865329	0.133788	261.0011608	0.274318	0.24521
0.0000298	0.152074	1.6897145	0.152074	297.2819054	0.235625	0.215284
0.00003485	0.177845	1.9760587	0.177845	347.6602149	0.193553	0.184088
3.83167E-05	0.195536	2.172625	0.195536	382.2433448	0.173067	0.167433
4.15167E-05	0.211866	2.3540709	0.211866	415.0122516	0.159881	0.154212
0.0000435	0.221988	2.4665295	0.221988	435.7254343	0.155304	0.146881
4.83663E-05	0.246821	2.7424597	0.000847	484.4699548	0.134347	0.132103
5.11833E-05	0.261197	2.9021886	0.000849	511.6429645	0.12952	0.125087



ตารางที่ 12 การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$\dot{m}$ (kg/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
5.01167E-05	0.255753	2.8417	0.000849	500.9790936	0.133794	0.12775
5.24333E-05	0.267575	2.9730589	0.000851	523.0686171	0.127407	0.122355
6.39333E-05	0.326262	3.6251284	0.000851	637.7912318	0.102022	0.100346
0.00006415	0.327367	3.6374138	0.000851	639.9526724	0.107756	0.100007
7.28333E-05	0.37168	4.1297735	0.000853	725.0937099	0.092129	0.088264
7.48833E-05	0.382141	4.2460119	0.000853	745.502526	0.097815	0.085848



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของน้ำในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ค

สอบเทียบอุปกรณ์การทดลองของอากาศ

สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของอากาศสามารถหาค่าได้จากสมการ

$$f = \frac{2\Delta P_{\text{friction}}D}{L\rho_{\text{T.S.}}V_2^2} \quad (9)$$

$$\Delta P_{\text{friction}} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2) - \rho_{\text{T.S.}}gZ_2 - \Delta P_{\text{inlet}} \quad (10)$$

$$\Delta P_{\text{inlet}} = \frac{\rho_{\text{T.S.}}k_e V_2^2}{2} \quad (11)$$

$$\rho_{\text{T.S.}} = \frac{P_{\text{in}} + P_{\text{atm}}}{2RT} \quad (12)$$

เมื่อ

$f$	คือ ปัจจัยแรงเสียดทานของน้ำ
$P_1$	คือ ความดันที่วัดได้ที่ค่าความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa)
$P_2$	คือ ความดันสัมบูรณ์ (พาสคาล, Pa)
$\rho_{\text{T.S.}}$	คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, $\text{kg/m}^3$ )
$V_1$	คือ ความเร็วของน้ำในท่อสแตนเลส (เมตรต่อวินาที, $\text{m/s}$ )
$V_2$	คือ ความเร็วของน้ำในท่อไมโครแคนเนล (เมตรต่อวินาที, $\text{m/s}$ )
$g$	คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง, $\text{m/s}^2$ )
$Z_2$	คือ ความยาวของท่อไมโครแคนเนลและสแตนเลส (เมตร, $\text{m}$ )
$k_e$	คือ Contraction coefficient = 0.475
$D$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไมโครแคนเนล (เมตร, $\text{m}$ )
$L$	คือ ความยาวของท่อไมโครแคนเนล (เมตร, $\text{m}$ )

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก(12)จะได้ $\rho_{T.S.}$ เท่ากับ

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

$$\rho_{T.S.} = 1.830334207 \text{ kg/m}^3$$

นำ $\rho_{T.S.}$  แทนใน(11)จะได้

$$\Delta P_{inlet} = \frac{1.662046847 \text{ kg/m}^3 \times 0.475 \times 0.233422525^2 \text{ m/s}}{2}$$

$$\Delta P_{inlet} = 72.90590887$$

นำ $\Delta P_{inlet}$  แทนใน (10)จะได้

$$\Delta P_{friction} = 138325 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa} + \frac{998 \text{ kg/m}^3}{2} (0.021008027^2 \text{ m/s} - 0.233422525^2 \text{ m/s}) - 998 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.144 \text{ m} - 72.90590887$$

$$\Delta P_{friction} = 78772.50333$$

นำ $\Delta P_{friction}$  แทนใน (9)จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานของอากาศเท่ากับ

$$f = \frac{2 \times 78772.50333 \times 0.00015 \text{ m}}{0.104 \times 1.662046847 \text{ kg/m}^3 \times 0.233422525^2 \text{ m/s}}$$

$$f_{exp} = 8.681832485$$

สารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

It is forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. การหาปัจจัยแรงเสียดทานของอากาศทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการ

$$f_{\text{theory}} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (13)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V_2 D}{\mu} \quad (14)$$

$$\mu = \frac{aT^{1/2}}{1+b/T} \quad (15)$$

เมื่อ

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

b คือ ค่าคงที่เท่ากับ (110.4K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

ตัวอย่างการคำนวณ

จาก(15)จะได้

$$\mu = \frac{1.458 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{k}^{1/2}) \times 295.226 \text{ K}^{1/2}}{1 + \frac{110.4 \text{ K}}{295.226 \text{ K}}}$$

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

นำ  $\mu$  แทนใน (14)จะได้

$$\text{Re} = \frac{1.830334207 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 13.59026505^2 \text{ m}/\text{s} \times 0.00015 \text{ m}}{1.82332 \text{E} - 05 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{k}^{1/2})}$$

$$\text{Re} = 185.8227162$$

นำ Re แทนใน (13) จะได้ปัจจัยแรงเสียดทานทางทฤษฎีเท่ากับ

$$f_{\text{theory}} = \frac{64}{185.8227162} = 0.344414296$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 13 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.629E-07	9.21967	9.219673	1.40963715	106.0550795	0.932833	0.60346
2.433E-07	13.7662	13.76629	1.47095111	165.2432824	0.509621	0.387307
3.199E-07	18.1033	18.10339	1.54978334	228.9494736	0.356368	0.279537
3.931E-07	22.2434	22.24341	1.74631079	316.9024908	0.322168	0.201954
4.666E-07	26.4067	26.40671	1.77841746	383.1340821	0.237256	0.167043
5.43E-07	30.7301	30.73013	1.81782109	455.7411572	0.182738	0.140430
6.092E-07	34.4721	34.47217	1.95062594	548.5868413	0.163642	0.116663

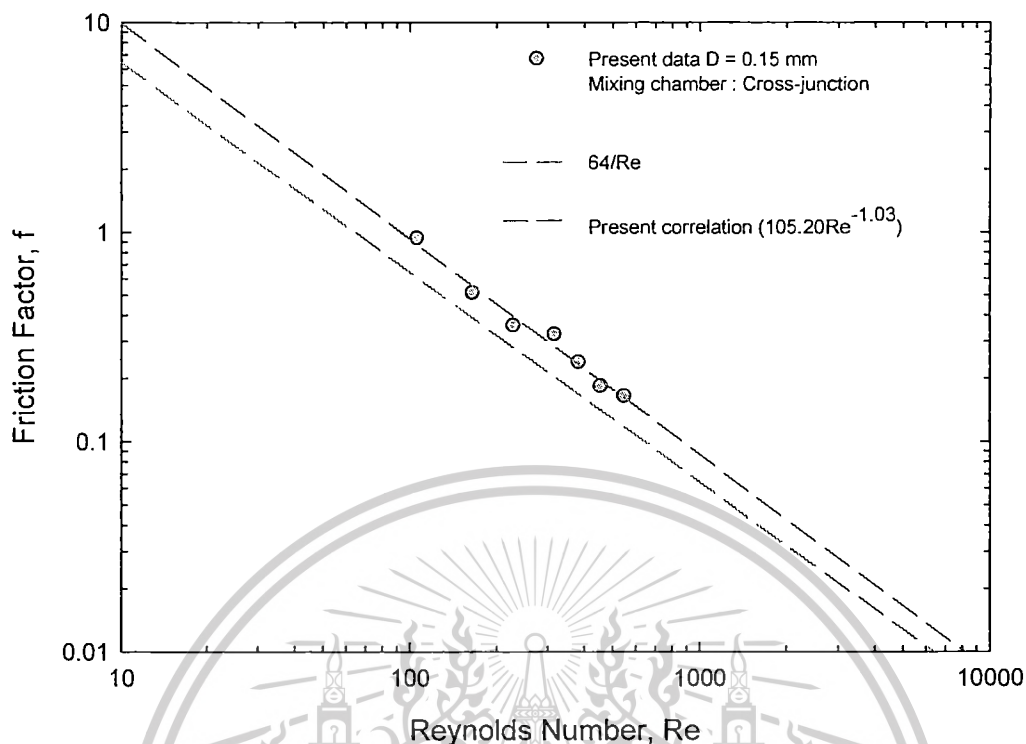
ตารางที่ 14 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.629E-07	9.21967	9.219673	1.40963715	106.0550795	0.932833	0.60346
2.433E-07	13.7662	13.76629	1.47095111	165.2432824	0.509621	0.387307
3.199E-07	18.1033	18.10339	1.54978334	228.9494736	0.356368	0.279537
3.931E-07	22.2434	22.24341	1.74631079	316.9024908	0.322168	0.201954
4.666E-07	26.4067	26.40671	1.77841746	383.1340821	0.237256	0.167043
5.43E-07	30.7301	30.73013	1.81782109	455.7411572	0.182738	0.140430
6.092E-07	34.4721	34.47217	1.95062594	548.5868413	0.163642	0.116663

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ (แกน X) กับปัจจัยแรงเสียดทาน (แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแชนแนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 15 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.64252E-07	0.836528	9.294764	1.55756	120.2631	1.241183	0.532166
2.40234E-07	1.223503	13.59448	1.66204	185.8804	0.739764	0.344307
3.17933E-07	1.619221	17.99135	1.71426	253.2908	0.457943	0.252674
3.95097E-07	2.012213	22.35792	1.75534	321.0434	0.316761	0.19935
4.65402E-07	2.370273	26.33637	1.83033	394.1339	0.247819	0.162381
5.34558E-07	2.722481	30.24979	1.94325	480.3944	0.207958	0.133224
5.94205E-07	3.026261	33.62512	2.14782	590.7905	0.192687	0.108329
6.54311E-07	3.332378	37.02642	2.29720	696.1356	0.171222	0.091936
7.16517E-07	3.649191	40.54656	2.36599	784.3792	0.147312	0.081593

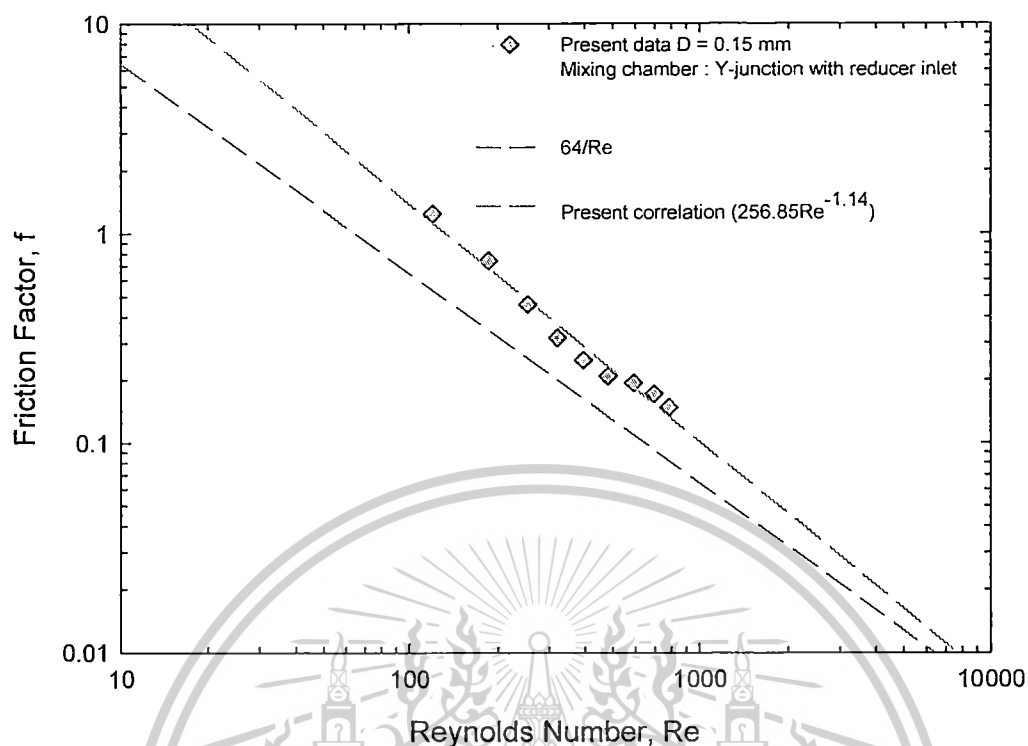
ตารางที่ 16 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.68619E-07	0.858768	9.541868	1.51723	120.2631	1.068034	0.532166
2.45909E-07	1.252406	13.91563	1.62368	185.8804	0.663009	0.344307
3.25336E-07	1.656924	18.41027	1.67525	253.2908	0.413818	0.252674
4.04548E-07	2.060344	22.89271	1.71433	321.0434	0.286837	0.19935
4.76841E-07	2.428530	26.98366	1.78642	394.1339	0.225191	0.162381
5.48174E-07	2.791825	31.02028	1.89499	480.3944	0.189689	0.133224
6.09158E-07	3.102414	34.47127	2.09510	590.7905	0.177477	0.108329
6.70128E-07	3.412933	37.92148	2.24298	696.1356	0.158858	0.091936
7.33997E-07	3.738218	41.53575	2.30965	784.3792	0.136786	0.081593

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ (แกน X) กับปัจจัยแรงเสียดทาน (แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครเซนเซอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.15 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

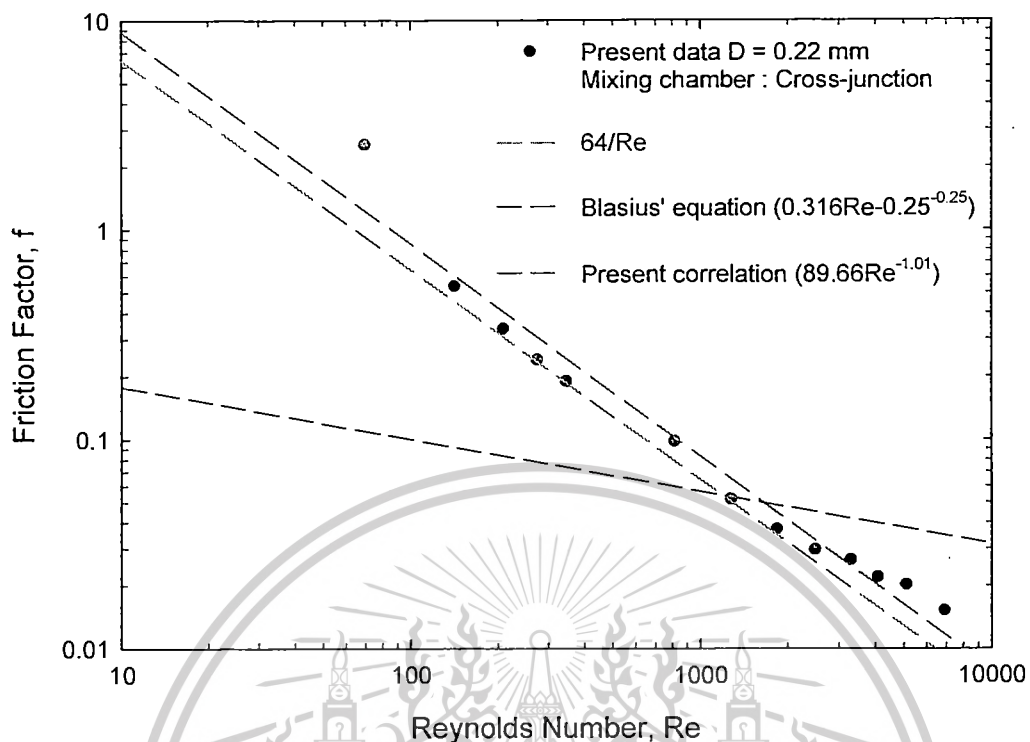
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 17 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.69E-07	3.451592	4.457118	1.300187848	69.90560452	2.518777	0.91552
3.54E-07	7.212610	9.313805	1.273160798	141.6115537	0.530409	0.451941
5.1E-07	10.39959	13.42923	1.306011339	209.5547004	0.333945	0.30541
6.59E-07	13.42435	17.33517	1.329709112	275.0116158	0.23783	0.232717
8.12E-07	16.54139	21.36027	1.364601982	347.759593	0.187709	0.184035
1.6E-06	32.62356	42.12754	1.626811681	817.8528266	0.097053	0.078254
2.35E-06	47.96834	61.9426	1.727705511	1277.427881	0.051397	0.050101
3.06E-06	62.37615	80.54773	1.922040334	1847.5134	0.036829	0.034641
3.7E-06	75.42545	97.39858	2.151824211	2501.101003	0.029307	0.025589
4.22E-06	86.02294	111.0833	2.503107193	3318.988035	0.026273	0.019283
4.79E-06	97.67377	126.1283	2.72278009	4099.231713	0.02172	0.015613
5.23E-06	106.6045	137.6609	3.125756198	5136.21183	0.019972	0.012461

ตารางที่ 18 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.69E-07	3.451592	4.457118	1.300187848	69.90560452	2.518777	0.91552
3.54E-07	7.212610	9.313805	1.273160798	141.6115537	0.530409	0.451941
5.1E-07	10.39959	13.42923	1.306011339	209.5547004	0.333945	0.30541
6.59E-07	13.42435	17.33517	1.329709112	275.0116158	0.23783	0.232717
8.12E-07	16.54139	21.36027	1.364601982	347.759593	0.187709	0.184035
1.6E-06	32.62356	42.12754	1.626811681	817.8528266	0.097053	0.078254
2.35E-06	47.96834	61.9426	1.727705511	1277.427881	0.051397	0.050101
3.06E-06	62.37615	80.54773	1.922040334	1847.5134	0.036829	0.034641
3.7E-06	75.42545	97.39858	2.151824211	2501.101003	0.029307	0.025589
4.22E-06	86.02294	111.0833	2.503107193	3318.988035	0.026273	0.019283
4.79E-06	97.67377	126.1283	2.72278009	4099.231713	0.02172	0.015613
5.23E-06	106.6045	137.6609	3.125756198	5136.21183	0.019972	0.012461



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

ตารางที่ 19 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
8.2699E-08	0.421185	2.175545	1.207273	31.35856	3.044209624	2.04091
1.6532E-07	0.842003	4.349188	1.21853	63.25891	1.0708583	1.011715
2.4794E-07	1.262751	6.522473	1.230557	95.82894	0.610077985	0.667857
3.3079E-07	1.68474	8.702169	1.262174	131.1064	0.543942142	0.488153
4.1295E-07	2.10317	10.86348	1.269848	164.7038	0.376554819	0.388576
4.9437E-07	2.517819	13.00527	1.294996	201.1296	0.327952365	0.318203
5.7822E-07	2.944881	15.21116	1.318704	239.6093	0.282745475	0.267101
6.5948E-07	3.358736	17.34885	1.33181	275.9984	0.235172588	0.231885
7.4052E-07	3.771485	19.48081	1.375929	320.26	0.232586568	0.199838
8.3361E-07	4.245571	21.9296	1.384087	362.8316	0.188778705	0.17639
8.3401E-07	4.247585	21.94001	1.385402	363.6141	0.188415752	0.176011
1.5843E-06	8.06906	41.67903	1.698689	847.3667	0.107018451	0.075528
2.0232E-06	10.30415	53.22394	2.816939	1794.421	0.12590601	0.035666
2.5103E-06	12.78523	66.03942	3.400881	2688.034	0.09124283	0.023809
8.7425E-06	44.52559	229.9875	1.364382	3755.607	-0.00106053	0.017041
1.1202E-05	57.05453	294.7031	1.399418	4935.967	-0.00151928	0.012966
1.362E-05	69.3662	358.2965	1.450973	6223.687	-0.00173492	0.010283

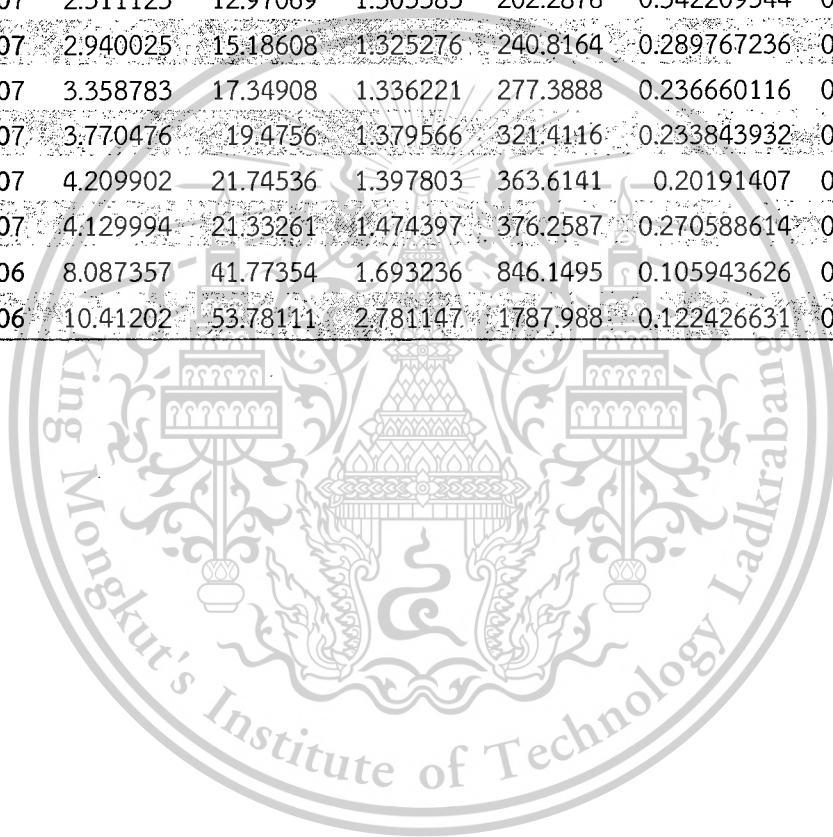
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 20 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแชนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

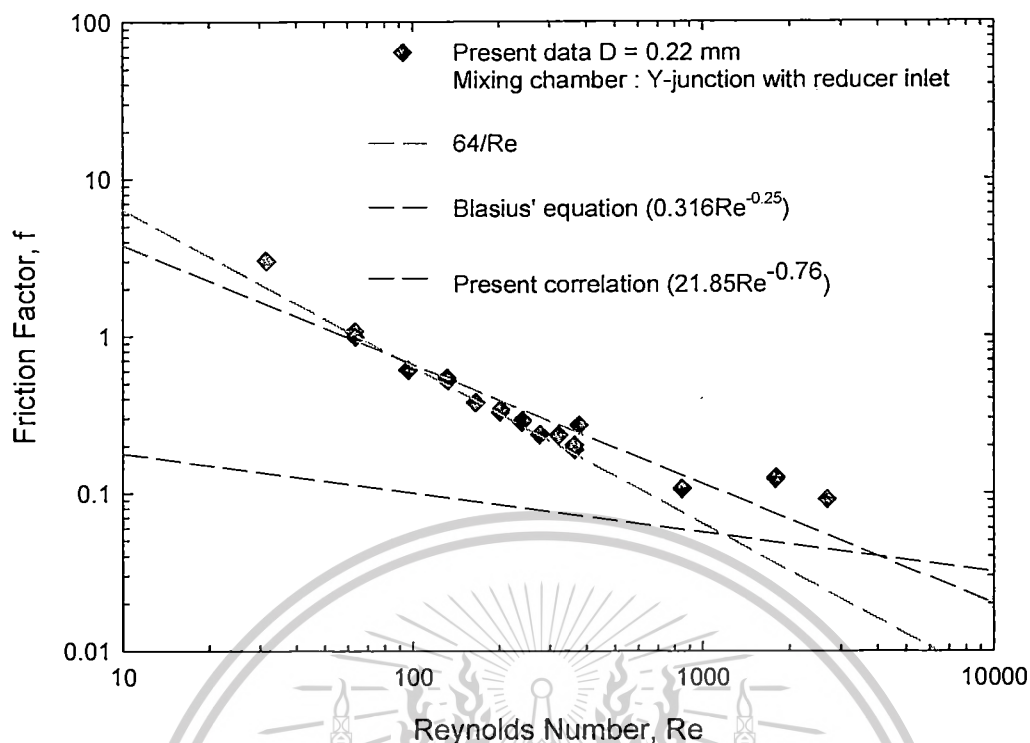
$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
8.2824E-08	0.42182	2.178821	1.210038	31.53908	2.996191447	2.029229
1.6595E-07	0.845219	4.365801	1.219084	63.66864	0.983319817	1.005204
2.4825E-07	1.264348	6.530722	1.233673	96.38057	0.60698692	0.664034
3.3208E-07	1.691303	8.736067	1.263251	132.0504	0.520229801	0.484663
4.1330E-07	2.104958	10.87271	1.274197	165.771	0.377661952	0.386075
4.9305E-07	2.511125	12.97069	1.303385	202.2878	0.342209344	0.316381
5.7727E-07	2.940025	15.18608	1.325276	240.8164	0.289767236	0.265763
6.5949E-07	3.358783	17.34908	1.336221	277.3888	0.236660116	0.230723
7.4033E-07	3.770476	19.4756	1.379566	321.4116	0.233843932	0.199122
8.2661E-07	4.209902	21.74536	1.397803	363.6141	0.20191407	0.176011
8.1092E-07	4.129994	21.33261	1.474397	376.2587	0.270588614	0.170096
1.5879E-06	8.087357	41.77354	1.693236	846.1495	0.105943626	0.075637
2.0444E-06	10.41202	53.78111	2.781147	1787.988	0.122426631	0.035794



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ (แกน X) กับปัจจัยแรงเสียดทาน (แกน Y) การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.22 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 - 4 และ 0 - 10 บาร์

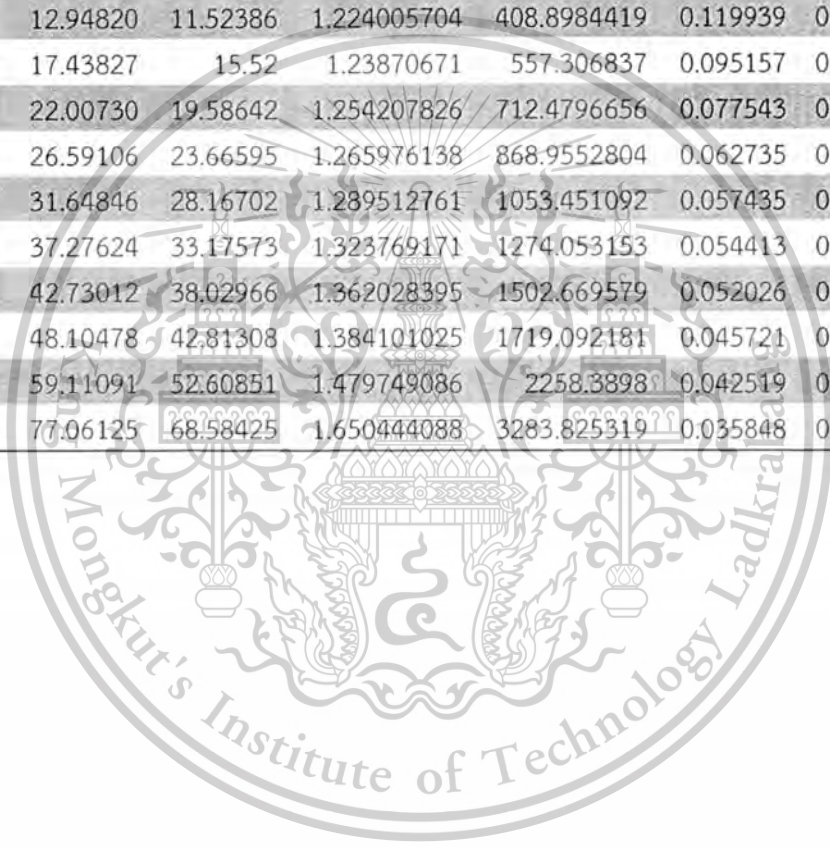
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 21 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.67E-07	0.849995	0.756493	1.197543895	26.26216658	5.137636	2.436966
3.34E-07	1.699926	1.512928	1.200484096	52.65126503	1.924625	1.215545
5.01E-07	2.552895	2.272068	1.201954196	79.16683744	0.99495	0.808419
6.7E-07	3.411789	3.036481	1.204894397	106.0604755	0.714928	0.603429
8.39E-07	4.274504	3.804294	1.207834599	133.2034719	0.555589	0.480468
1.69E-06	8.587231	7.642605	1.213715001	268.9008615	0.187186	0.238006
2.54E-06	12.94820	11.52386	1.224005704	408.8984419	0.119939	0.156518
3.42E-06	17.43827	15.52	1.23870671	557.306837	0.095157	0.114838
4.32E-06	22.00730	19.58642	1.254207826	712.4796656	0.077543	0.089827
5.22E-06	26.59106	23.66595	1.265976138	868.9552804	0.062735	0.073652
6.21E-06	31.64846	28.16702	1.289512761	1053.451092	0.057435	0.060753
7.32E-06	37.27624	33.17573	1.323769171	1274.053153	0.054413	0.050233
8.39E-06	42.73012	38.02966	1.362028395	1502.669579	0.052026	0.042591
9.45E-06	48.10478	42.81308	1.384101025	1719.092181	0.045721	0.037229
1.16E-05	59.11091	52.60851	1.479749086	2258.3898	0.042519	0.028339
1.51E-05	77.06125	68.58425	1.650444088	3283.825319	0.035848	0.019489



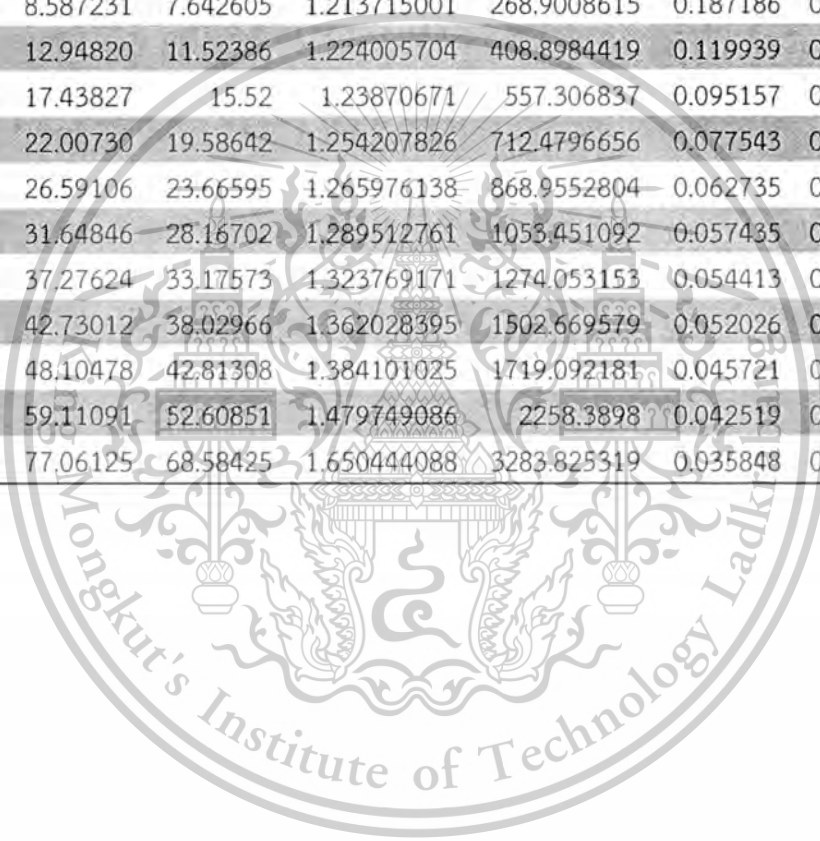
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 22 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

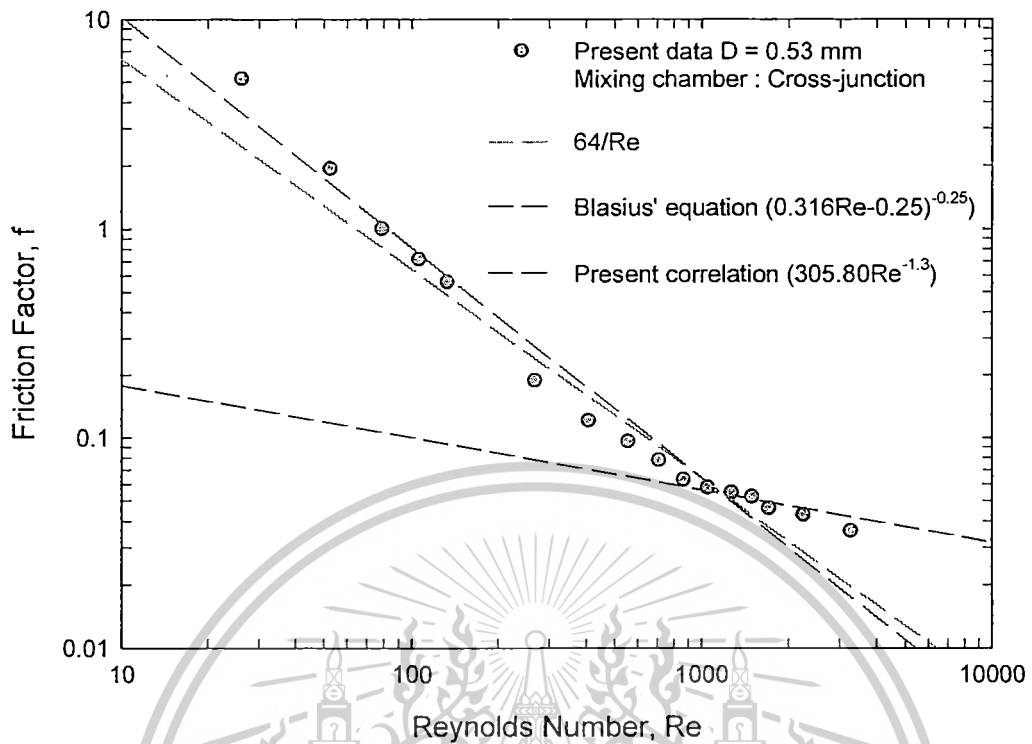
$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.67E-07	0.849995	0.756493	1.197543895	26.26216658	5.137636	2.436966
3.34E-07	1.699926	1.512928	1.200484096	52.65126503	1.924625	1.215545
5.01E-07	2.552895	2.272068	1.201954196	79.16683744	0.99495	0.808419
6.7E-07	3.411789	3.036481	1.204894397	106.0604755	0.714928	0.603429
8.39E-07	4.274504	3.804294	1.207834599	133.2034719	0.555589	0.480468
1.69E-06	8.587231	7.642605	1.213715001	268.9008615	0.187186	0.238006
2.54E-06	12.94820	11.52386	1.224005704	408.8984419	0.119939	0.156518
3.42E-06	17.43827	15.52	1.23870671	557.306837	0.095157	0.114838
4.32E-06	22.00730	19.58642	1.254207826	712.4796656	0.077543	0.089827
5.22E-06	26.59106	23.66595	1.265976138	868.9552804	0.062735	0.073652
6.21E-06	31.64846	28.16702	1.289512761	1033.451092	0.057435	0.060753
7.32E-06	37.27624	33.17573	1.323769171	1274.053153	0.054413	0.050233
8.39E-06	42.73012	38.02966	1.362028395	1502.669579	0.052026	0.042591
9.45E-06	48.10478	42.81308	1.384101025	1719.092181	0.045721	0.037229
1.16E-05	59.11091	52.60851	1.479749086	2258.3898	0.042519	0.028339
1.51E-05	77.06125	68.58425	1.650444088	3283.825319	0.035848	0.019489



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครเซนเนลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Cross-junction ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 23 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ ตัวควบคุมความดัน 0-4 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
1.64204E-07	0.3716825	0.74429129	1.86E-05	24.9767	6.2365	2.562388
2.46302E-07	0.557513	1.11641525	1.86E-05	37.5747	4.4283	1.703274
3.28396E-07	0.7433375	1.48852747	1.86E-05	50.1968	3.1087	1.274981
4.10487E-07	0.9291522	1.86061977	1.86E-05	62.8674	2.3833	1.018017
4.92572E-07	1.1149548	2.23268814	1.86E-05	75.5861	1.9274	0.846716
5.74651E-07	1.3007436	2.60472865	1.86E-05	88.353	1.6152	0.724367
6.56394E-07	1.4857711	2.9752447	1.86E-05	101.264	1.5039	0.632011
7.38766E-07	1.6722233	3.34861382	1.86E-05	114.193	1.3063	0.560456
8.18872E-07	1.8535477	3.71171436	1.86E-05	126.881	1.184	0.504411
1.64397E-06	3.7211877	7.45164858	1.86E-05	256.814	0.3934	0.249208
2.46441E-06	5.5782782	11.1704574	1.86E-05	391.421	0.2643	0.163507
3.32483E-06	7.5258749	15.0705042	1.86E-05	531.186	0.1617	0.120485
4.17681E-06	9.4543629	18.932286	1.86E-05	678.22	0.1318	0.094365
4.98342E-06	11.280155	22.5884203	1.86E-05	830.597	0.1253	0.077053
6.01011E-06	13.604109	27.2421184	1.86E-05	999.474	0.0836	0.064034
6.65264E-06	15.058493	30.154511	1.86E-05	1116.26	0.0742	0.057334
8.4145E-06	19.046521	38.1405048	1.86E-05	1470.02	0.063	0.043537
1.02116E-05	23.114268	46.2861364	1.86E-05	1907.92	0.0607	0.033544
1.17249E-05	26.539832	53.1458009	1.86E-05	2343.93	0.0588	0.027305
1.25286E-05	28.359042	56.788755	1.86E-05	1896.34	-0.0019	0.033749

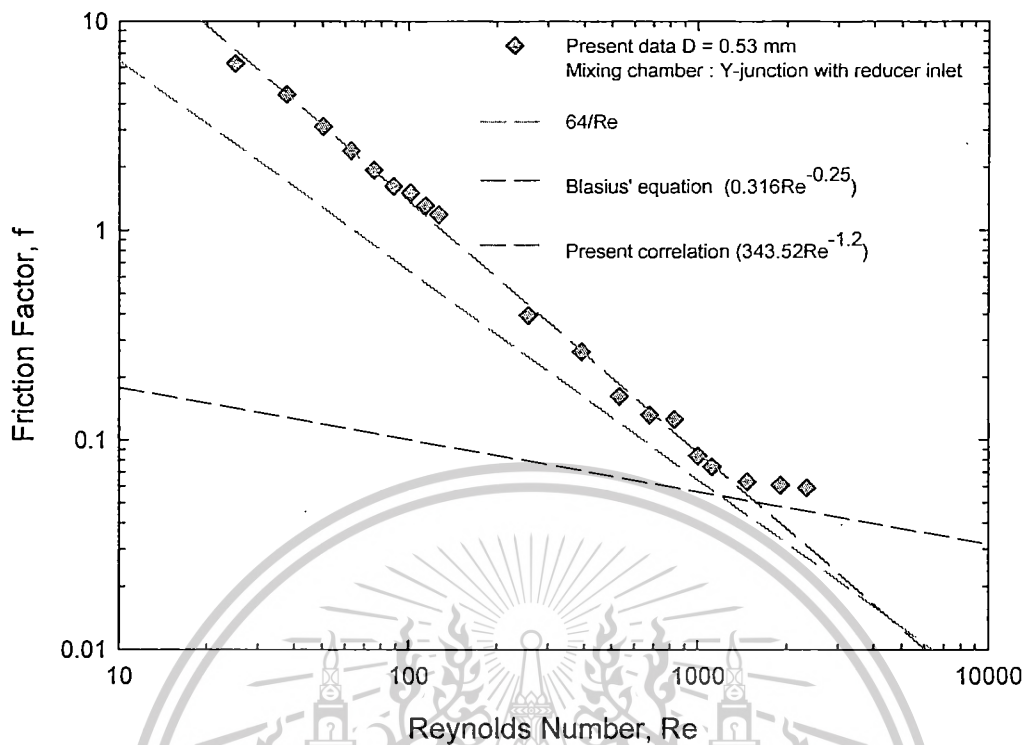
ตารางที่ 24 การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครแขนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ ตัวควบคุมความดัน 0-10 บาร์

$Q_{T.S.}$	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\mu_{air}$	Re	f	$f = \frac{64}{Re}$
6.01011E-06	13.604109	27.2421184	1.86E-05	999.474	0.0836	0.064034
6.65264E-06	15.058493	30.154511	1.86E-05	1116.26	0.0742	0.057334
8.4145E-06	19.046521	38.1405048	1.86E-05	1470.02	0.063	0.043537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์(แกน X)กับปัจจัยแรงเสียดทาน(แกน Y)การสอบเทียบอุปกรณ์ของอากาศในท่อไมโครเซนเนสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร ของ mixing chamber แบบ Y-junction with reducer inlet ที่ตัวควบคุมความดัน 0 – 4 และ 0 - 10 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	50,000	50,000	-
ค่าวัสดุ	150,000	150,000	-
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	180,900	179,725.85	1,174.15
รวม	380,900	379,857.25	1,174.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ข้อมูลประวัติผู้วิจัย

ชื่อ (ภาษาไทย) นายศิริระ สายศร

2. ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Mr. Sira Saisorn

3. วันเดือนปีเกิด 10 มีนาคม 2520

4. สถานที่เกิด กรุงเทพมหานคร

5. สถานภาพการสมรส สมรสแล้ว

6. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

7. ที่อยู่หน่วยงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดม

ศักดิ์

17/1 หมู่ 6 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160

8. เบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้/ เบอร์โทรศัพท์มือถือ 086-3984633

9. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชาเอก	วิชาเอก	สถาบันการศึกษา	ประเทศ
2553	เอก	Ph.D	Energy Technology	Two-phase flow	บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ไทย
2545	โท	วศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	Two-phase flow	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	ไทย
2542	ตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	-	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย

10. ประวัติการทำงานที่สำคัญ และ Professional Activities อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

11. เกียรติประวัติ/รางวัลที่เคยได้รับ

Outstanding oral presentation in RGJ-Ph.D. Congress IX, April 4-6, 2008

The Thailand Research Fund

12. ผลงาน เช่น วารสารวิชาการระดับนานาชาติ, วารสารวิชาการระดับชาติ, หนังสือ สิทธิบัตร (ทั้งในประเทศและต่างประเทศ)

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. Saisorn S., Kuaseng P., Wongwises S., 2014, Heat transfer characteristics of gas-liquid flow in horizontal rectangular micro-channels, *Experimental Thermal and Fluid Science* 55, 54-61.
2. Saisorn S, Kaew-On J, Wongwises S., 2013, An experimental investigation of flow boiling heat transfer of R-134a in horizontal and vertical mini-channels. *Experimental Thermal and Fluid Science* 46, 232-244.
3. Saisorn S, Wongwises S., 2012, A critical review of recent investigations on flow pattern and heat transfer during flow boiling in micro-channels. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* 2012; 3, 013006. DOI: 10.5098/hmt.v3.1.3006.
4. Saisorn S, Wongwises S., 2012, A critical review of recent investigations on two-phase pressure drop in flow boiling micro-channels. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* 2012; 3, 013007. DOI: 10.5098/hmt.v3.1.3007.
5. Saisorn S, Wongwises S., 2011, Two-phase air-water flow in micro-channels: An investigation of the viscosity models for pressure drop prediction. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38, 212-217.
6. Saisorn S, Kaew-On J, Wongwises S., 2011, Two-phase flow of R-134a refrigerant during flow boiling through a horizontal circular mini-channel. *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, 887-895.
7. Saisorn S, Kaew-On J, Wongwises S., 2010, Flow pattern and heat transfer characteristics of R-134a refrigerant during flow boiling in a horizontal circular mini-channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 4023-4038.
8. 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.
9. 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.
10. Saisorn S, Wongwises S., 2008, A review of two-phase gas-liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 12, 824-838.
11. 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.
12. Saisorn S, Wongwises S., 2008, An inspection of viscosity model for homogeneous two-phase flow pressure drop prediction in a horizontal circular micro-channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35, 833-838.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. Saisorn S, Wongwises, S., 2013, An experimental investigation of gas-liquid heat transfer in rectangular micro-channels, *Proceedings of the ASME 2013 11<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels ICNMM2013*, June 16-19, 2013, Sapporo Japan.
2. Saisorn S, Wongwises S. Flow pattern, void fraction and pressure drop during adiabatic two-phase gas-liquid flow in vertical micro-channel. *Proceedings of the ASME 2012 10<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels ICNMM2012*, July 8-12, 2012, Rio Grande, Puerto Rico.
3. Saisorn S, Wongwises S. Two-phase flow in vertical circular micro-channel. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering*, 24-27 October, 2012, Chiang Rai, Thailand
4. Saisorn S, Wongwises S. Two-phase flow in vertical circular micro-channel. *The 2<sup>nd</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering*, 19-21 October, 2011, Krabi, Thailand.
5. Saisorn S, Kaew-On J, Wongwises S. Flow boiling heat transfer characteristics of R-134a in horizontal and vertical mini-channels. *Proceedings of the ASME 2010 8<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, August 1-5, 2010 Montreal Canada.
6. Saisorn S, Wongwises S. Two-phase flow in circular micro-channels. *ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale*, September 21-26, 2008, Whistler Canada,

