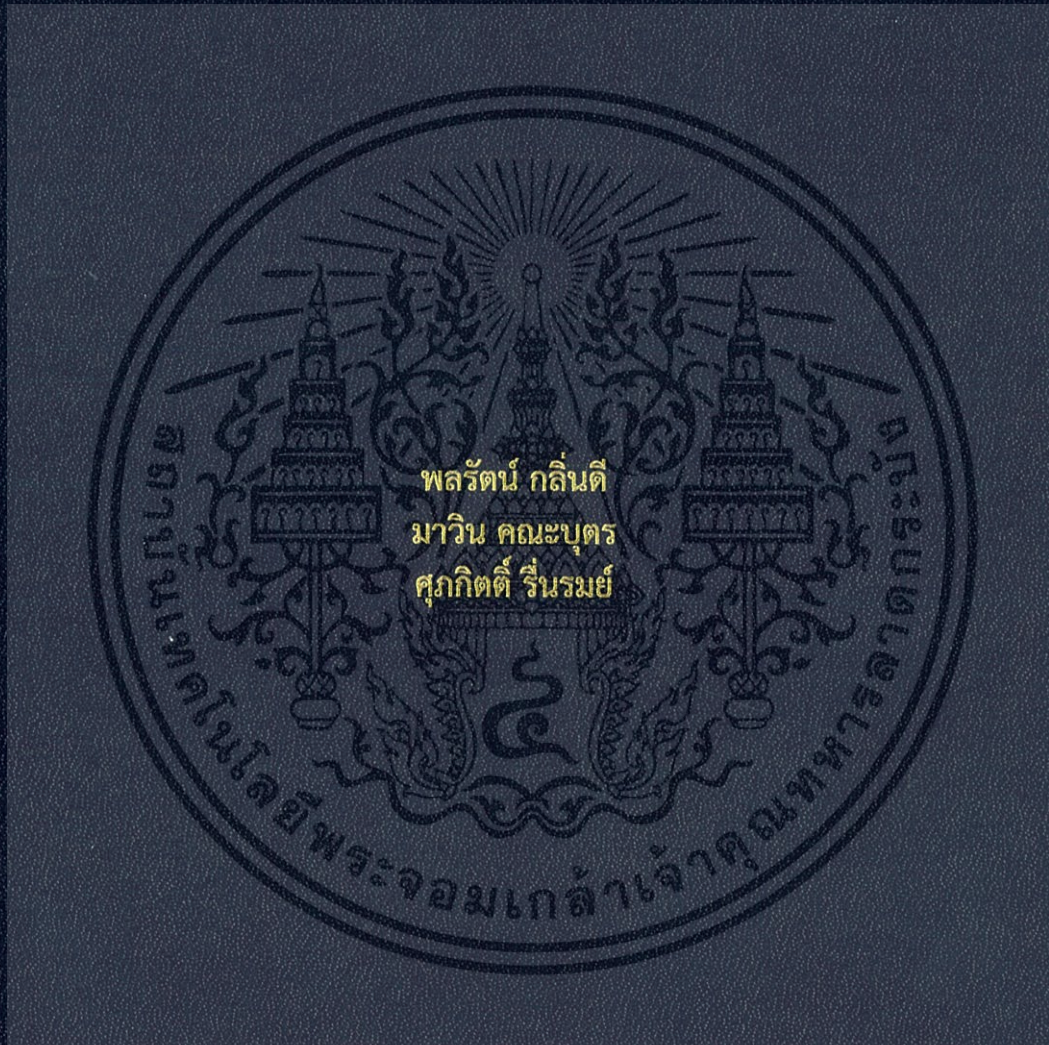


การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของน้ำ-อากาศใน
ไมโครแชนแนลรูปคลื่น

An experimental study of heat transfers characteristics of water-air flow in
wavy microchannel



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของน้ำ-อากาศใน
ไมโครเซนแนลรูปคลื่น

An experimental study of heat transfers characteristics of water-air flow in
wavy microchannel



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An experimental study of heat transfers characteristics of water-air flow in wavy microchannel



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของน้ำ-อากาศในไมโครแชนแนล
รูปคลื่น

An experimental study of heat transfers characteristics of water-air flow in wavy
microchannel

ผู้จัดทำ

1. นาย พลรัตน์ กลิ่นดี

รหัสประจำตัว 58010845

2. นาย มาวิน คณะบุตร

รหัสประจำตัว 58011015

3. นาย ศุภกิตต์ รื่นรัมย์

รหัสประจำตัว 58011235

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทดลองของลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของน้ำ-อากาศในช่องการไหลขนาดเล็ก
รูปคลื่น

นายพลรัตน์	กลินดี	58010845
นายมาวิน	คณะบุตร	58011015
นายศุภกิตต์	รินรมย์	58011235
ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2561		

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาทดลองการถ่ายเทความร้อนและการไหลของน้ำ-อากาศในไมโคร-
แชนแนลฮีตซิงก์ ซึ่งประกอบด้วยช่องการไหลขนาดเล็กรูปคลื่นทำจากทองแดง หน้าตัดสี่เหลี่ยม ความ
กว้างของท่อ $800 \mu m$ สูง $500 \mu m$ ค่าแอมพลิจูดของคลื่น $500 \mu m$ จำนวน 26 ช่อง ที่ค่าตัวเลขเรย์
โนลด์ 100 ถึง 400 สำหรับการไหลแบบสถานะเดียว และ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลแบบสอง
สถานะที่ 100 ถึง 500 สำหรับการไหลแบบสองสถานะ ในการทดลองใช้น้ำและอากาศเป็นของไหลทำงาน
ผลการทดลองที่เป็นค่าตัวเลขนัสเซิลท์และค่าความดันลด ถูกนำมาเปรียบเทียบกับช่องการไหลตรงขนาด
เล็ก หน้าตัดสี่เหลี่ยม ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดและความยาวรวมเท่ากัน นำมาคำนวณในรูปของค่าค่าสมรรถ
ณะของการถ่ายเทความร้อน จากการทดลองพบว่าช่องการไหลแบบโค้งให้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าช่อง
การไหลแบบตรงในทั้งสองรูปแบบการไหล ตามด้วยผลของความดันลดที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้วย
ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา เนื่องจากเกิด
การไหลทุติยภูมิในท่อโค้งต่อเนื่องทำให้เกิดการพาแบบยุ่งเหยิง ส่งผลให้การผสมกันของของไหลและการ
ถ่ายเทความร้อนทำได้ดีขึ้น กล่าวโดยสรุป เปรียบเทียบกับการไหลในท่อตรง การไหลในท่อโค้งมีความ
ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการไหลในท่อตรง โดยมีการเพิ่มขึ้นของความดันลดที่น้อยกว่ามาก และสามารถนำไปใช้
ประโยชน์ในทางปฏิบัติได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFERS CHARACTERISTIC OF WATER-AIR FLOW IN WAVY MICROCHANNEL

Polrat	Klindee	58010845
Mawin	Khanabut	58011015
Suppakit	Ruenrom	58011235
Dr.Maturose	Suchatawat	Advisor
Year 2018		

ABSTRACT

In this study, the experiment of heat transfer and water-air flow in wavy microchannels heat sink (MCHS) with rectangular cross-section was conducted. MCHS test section consists of 26 wavy channels, with each channel width of 800 μm , depth of 500 μm and wavy amplitude of 500 μm . The experiment used water as working fluid at Reynold numbers range from 100 to 400 for single-phase flow and two-phase Reynold number range from 100 to 500 for two-phase flow. Nusselt number and pressure drop were compared with those obtained from the straight microchannels in term of performance index (PI). It is found that the heat transfer of wavy microchannels is much better than that in straight microchannels for both single-phase and two-phase conditions and the pressure drop penalty can be much smaller. The experimental results evaluated agree reasonably well with the previous study. This is due to the development of secondary flow and Dean vortices, generated from wavy unit, which cause the chaotic advection. This mechanism results in enhancement of the fluid mixing and heat transfer performance. In summary, the present experimental study shows that wavy microchannels have advantages over those in straight channels and can be used further in practical applications.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพี่ปฐม เอี่ยมศิลป์ชัย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.4.1 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวในท่อตรงขนาดเล็ก.....	2
1.4.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวในท่อกว้างขนาดเล็ก.....	3
1.4.3 รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ.....	13
1.4.3.1 รูปแบบการไหลในท่อตรง.....	13
1.4.4 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะในท่อขนาดเล็ก.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 การไหลของของไหลสถานะเดียว (Single-phase fluid flow)	17
2.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของของไหลสถานะเดียว.....	17
2.2 การไหลของของไหลสองสถานะ (Two-phase fluid flow)	18
2.2.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของของไหลสองสถานะ.....	18
2.2.2 แผนที่รูปแบบการไหล (Flow visualization)	19
2.3 การถ่ายเทความร้อน.....	20
2.3.1 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสถานะเดียว.....	22
2.3.1.1 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสถานะเดียวในท่อตรง.....	22
2.3.1.2 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสถานะเดียวในท่อกว้าง.....	22
2.3.2 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะ.....	23
2.3.2.1 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อตรง.....	23
2.3.3 ค่าสรรณะของการถ่ายเทความร้อน (Performance index)	23

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	24
3.1 วงจรการทำงานและรายละเอียดของชุดทดลอง.....	24
3.1.1 คุณสมบัติของท่อคลื่นขนาดเล็ก.....	24
3.1.2 วงจรการทำงานของชุดทดลอง.....	25
3.1.3 รายละเอียดของชุดทดลอง.....	26
3.1.3.1 ฉนวนเรซิน.....	27
3.1.3.2 ไมโครเซนแนลฮีตซิงค์ทองแดง.....	28
3.2 ขั้นตอนการทำชุดทดลองและฉนวนเรซิน.....	29
3.2.1 การทำชุดทดลอง.....	29
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.4 ค่าที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.5 ขั้นตอนในการทดลอง.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	38
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง.....	38
4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลในท่อตรง.....	38
4.1.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสถานะเดียว.....	38
4.1.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะ.....	39
4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลในท่อคลื่น.....	41
4.1.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสถานะเดียว.....	41
4.2 รูปแบบของการไหล.....	42
4.2.1 รูปแบบการไหลในท่อคลื่น.....	42
4.3 การถ่ายเทความร้อน.....	45
4.3.1 การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสถานะเดียว.....	45
4.3.2 การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ.....	46
4.4 ความดันลด.....	50
4.4.1 ความดันลดของการไหลแบบสถานะเดียว.....	50
4.4.2 ความดันลดของการไหลแบบสองสถานะ.....	51
4.5 สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance Index, PI)	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
บรรณานุกรม.....	56

ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก.....	60
ภาคผนวก ข.....	61



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องไมโครแคนแนล.....	32
3.2 ค่าที่ใช้ในการทดลองในท่อตรงและท่อกว้างขณะทำการทดลองของไหลสถานะเดียว	37
3.3 ค่าที่ใช้ในการทดลองในท่อตรงและท่อกว้างขณะทำการทดลองของไหลสองสถานะ	37



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 100$	5
1.2 แบบจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 100$	6
1.3 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 300$	6
1.4 แบบจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแซนแนลรูปคลื่นที่ $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 300$	7
1.5 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 500$	7
1.6 แบบจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 500$	8
1.7 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.05$ ที่ $Re = 300$	8
1.8 Poincare Section ของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.05$ ที่ $Re = 300$	9
1.9 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแซนแนลรูปคลื่นความสูงคลื่น $A = 259\mu m$ ที่ $Re = 600$	11
1.10 แบบจำลองการไหลโดยการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคลอยในหน้าตัดของไมโครแซนแนลรูปคลื่น $A = 259\mu m$ ที่ $Re = 600$	12
1.11 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะ น้ำ-อากาศ ในท่อตรง.....	14
1.12 แสดงรูปแบบการไหลแบบ Throat-Annular flow	14
1.13 แสดงรูปแบบการไหลแบบ slug flow.....	15
2.1 แสดงรูปแบบการไหล แก๊ส-ของเหลว ภายในท่อกลมแนวนอน.....	20
2.2 แสดงรัศมีความโค้งของท่อรูปคลื่น.....	22
3.1 ไมโครแซนแนลด้านหน้าและพารามิเตอร์.....	24
3.2 พารามิเตอร์ของสมการกำหนดไมโครแซนแนลคลื่น.....	24
3.3 ลักษณะของไมโครแซนแนลคลื่น 1 ช่อง.....	25
3.4 วงจรการทำงานของชุดทดลอง.....	25
3.5 ชุดทดลองทองแดงหุ้มฉนวน	26
3.6 ส่วนประกอบของชุดทดลอง.....	26
3.7 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความดัน.....	27
3.8 ภาพฉายด้านบนของฉนวนเรซิน.....	27
3.9 ภาพฉายด้านข้างของฉนวนเรซิน.....	28
3.10 ภาพฉายด้านหน้าของฉนวนเรซิน.....	28
3.11 ภาพฉายด้านหน้าของฮีตซิงค์ทองแดง.....	28
3.12 การตัดชิ้นงานทองแดง.....	29
3.13 การปาดผิวชิ้นงาน.....	29

3.14	ชิ้นงานทองแดงที่ทำการเจาะรูฮีตเตอร์และทำความสะอาดผิวแล้ว.....	30
3.15	แบบหล่อชุดทดลอง.....	30
3.16	ก้อนทองแดงวางลงในแบบหล่อ.....	31
3.17	อีพอกซีเรซินแข็งตัวหลังจาก 12 ชั่วโมง.....	31
3.18	ชิ้นงานที่แกะจากแบบหล่อ.....	31
3.19	ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์.....	32
3.20	ปั้มน้ำแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง.....	33
3.21	เครื่องอัดอากาศ.....	33
3.22	อุปกรณ์ผสมรูปตัวที.....	34
3.23	โรตารีฮีตเตอร์.....	34
3.24	ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน.....	34
3.25	หน้าจอแสดงผลดิจิทัล.....	35
3.26	เครื่องบันทึกผลข้อมูล.....	35
3.27	มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล.....	36
3.28	ฮีตเตอร์แบบแท่ง.....	36
4.1	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลแบบสถานะเดียวที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของ Sieder-Tate.....	39
4.2	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลแบบสองสถานะ อากาศ-น้ำ ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายที่ถูกพัฒนาโดย Chuanshuai Dong & Takashi Hibiki.....	40
4.3	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สำหรับการไหลแบบสถานะเดียวที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของ Dravid et al.....	41
4.4	แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะ น้ำ-อากาศ ในท่อรูปคลื่น.....	42
4.5	แสดงรูปแบบการไหลแบบ slug flow.....	43
4.6	แสดงรูปแบบการไหลแบบ plug flow.....	43
4.7	แสดงรูปแบบการไหลแบบ bubbly flow.....	44
4.8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสถานะเดียวระหว่างไมโคร-แซนแนลแบบตรงและแบบคลื่น.....	45
4.9	กราฟแสดงผลของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแซนแนลแบบตรงต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำ.....	46
4.10	กราฟแสดงผลของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแซนแนลแบบคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำ.....	46
4.11	กราฟแสดงผลการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแซนแนลแบบตรงต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศ.....	47

4.12 กราฟแสดงผลของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายใน ไมโครเซนแนลแบบคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์์ของอากาศ.....	47
4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครเซนแนลแบบตรงและแบบคลื่น โดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์์แบบสองสถานะ.....	49
4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความดันลดของการไหลแบบสถานะเดียว ภายในไมโครเซนแนลแบบตรงและแบบคลื่น.....	50
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความดันลดของการไหลแบบสองสถานะ ภายในไมโครเซนแนลแบบตรงและแบบคลื่น โดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์์สองสถานะ.....	51
4.16 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในไมโครเซนแนลแบบคลื่นของการไหลแบบสถานะเดียว และเส้นแนวโน้ม.....	52
4.17 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในไมโครเซนแนลแบบคลื่นของการไหลแบบสองสถานะ.....	52



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงในขณะที่กำลังและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนาให้สูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้อุปกรณ์ทำงานมากขึ้นกว่าเดิมจึงจำเป็นที่จะต้องมีการระบายความร้อนที่เพิ่มขึ้น ถ้าหากการถ่ายเทความร้อนทำได้ไม่เหมาะสมเท่าที่ควร อาจส่งผลให้อายุการใช้งานและประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นลดลงได้ สำหรับเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่มีใช้ในปัจจุบันนั้นมีหลายวิธี เช่น การใช้พัดลมระบายความร้อน การใช้ครีระบายความร้อน และการใช้ไมโครแชนแนลที่มีของไหลไหลผ่านในช่องการไหลขนาดเล็ก เป็นต้น สำหรับการระบายความร้อนด้วยไมโครแชนแนลนั้น ที่ผ่านมามีการศึกษาและทดลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของไมโครแชนแนลในหลายๆด้าน เช่น การเปลี่ยนของไหลทำงานจากแบบสถานะเดียวให้เป็นแบบสองสถานะ การเปลี่ยนหน้าตัดของท่อให้เป็นรูปร่างเรขาคณิตต่างๆ เปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงตัวของท่อ การปรับอัตราการไหล การเปลี่ยนชนิดของของไหล เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปสิ่งที่คาดหวังจากการออกแบบในการพัฒนาอุปกรณ์ระบายความร้อน คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด และความดันตกที่ต่ำที่สุด จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการไหลแบบสถานะเดียวของของเหลวในท่อไมโครแชนแนลที่มีรูปร่างตามแนวยาวของท่อเป็นแบบคลื่น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลแบบสถานะเดียวของของเหลวในท่อไมโครแชนแนลที่เป็นแบบช่องการไหลแบบตรง และการไหลแบบสองสถานะ (น้ำ-อากาศ) ในท่อไมโครแชนแนลแบบตรงให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลแบบสถานะเดียวในท่อแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในขณะที่การศึกษาเชิงการทดลองยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงจะทำการศึกษาเชิงทดลองโดยใช้ของไหลทำงานคือ น้ำกลั่น ไหลผ่านท่อไมโครแชนแนลแบบสถานะเดียวและแบบผสมกับอากาศแบบสองสถานะ ไหลผ่านท่อไมโครแชนแนลแบบโค้งคลื่นรูปโคไซน์ โดยมีพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนเท่ากับท่อตรง วัสดุไมโครแชนแนลทำจากทองแดงที่มีค่าการนำความร้อนสูง ฐานหล่อด้วยอีพอกซีเรซินซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากฮีตเตอร์ด้านล่าง ไมโครแชนแนลแต่ละช่องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดกว้าง 0.8 mm ลึก 0.5 mm ความกว้างของครีบ 0.5 mm ความยาวในแนวตรง 40 mm เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.62 mm และมีค่าอัตราส่วนด้าน (Aspect ratio) เท่ากับ 0.63 จัดวางตัวในแนวนอน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับค่าการทดลองในไมโครแชนแนลแบบตรงว่าการไหลในรูปแบบใดให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า ในสภาวะที่อัตราการไหลเท่ากันและฮีตฟลักซ์คงที่ (Constant heat flux) โดยให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับจากทั้ง 3 ด้านของช่อง และถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากปลายครีบ (Adiabatic fin tip) ผลการทดลองจะรวมไปถึงการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของครีป ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการนำไปศึกษาและพัฒนาให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของไมโครแชนแนลดีขึ้นต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันตกที่เกิดขึ้นสำหรับการไหลสถานะเดียวและสองสถานะในท่อไมโครแชนแนลโค้งคลื่นรูปโคไซน์
2. ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน และความดันตกที่เกิดขึ้นในท่อตรงและคลื่น ทั้งการไหลแบบสถานะเดียวและสองสถานะ

1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลอง
2. ในการทดลองของไหลสถานะเดียวของไหลทำงานที่ใช้คือ น้ำกลั่น และการไหลสองสถานะ ของไหลทำงานที่ใช้คือ น้ำกลั่นและอากาศที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือดและฮีท-ฟลักซ์คงที่
3. ท่อไมโครแชนแนลทำจากทองแดงมีขนาดหน้าตัดกว้าง 0.8 mm. สูง 0.5 mm. จำนวน 26 ช่องสำหรับท่อคลื่นและ 30 ช่องสำหรับท่อตรง โดยท่อทั้งสองแบบมีขนาดความกว้างและสูงของท่อเท่ากัน ความยาวรวมของทุกท่อเท่ากันคือ 1200 mm ความกว้างครีป 0.5 mm และฐานล่างหล่อด้วยอีพอกซีเรซินที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.1 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวในท่อตรงขนาดเล็ก

สำหรับการศึกษาระบายความร้อนด้วยของไหลที่ไหลผ่านไมโครแชนแนลนั้น ในช่วงแรกจะเป็นการศึกษาโดยใช้ของไหลแบบสถานะเดียว (Single-phase) และการไหลแบบสองสถานะมีการเดือด (Two-phase boiling) โดยในแบบหลังนั้นจะให้คุณสมบัติการพาความร้อนในระดับที่สูงกว่าแบบแรกแต่ในขณะเดียวกันจะมีกลไกซับซ้อนมากกว่า เช่น ผลของอุณหภูมิมิวต์วของของไหล, การกลั่นตัว, การเกิดจุดศูนย์รวมความร้อน เป็นต้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนของปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดังกล่าว การไหลแบบสถานะเดียวจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจต่อการนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ได้

แนวคิดของการถ่ายเทความร้อนของของไหลในช่องการไหลขนาดเล็ก (ไมโครแชนแนล) ได้ถูกเสนอขึ้นโดย Tuckerman and Pease (1981) โดยการไหลจะเป็นแบบสถานะเดียวในท่อตรงขนาดเล็ก พบว่า การลดขนาดท่อให้เล็กลงจนถึงระดับท่อไมโครนั้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากผลของแรงยกตัว (Capillary force) ของของไหลขณะไหลผ่านท่อไมโครแชนแนล อย่างไรก็ตาม การผสมกัน (Mixing) ของของไหลแทบไม่เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นทางการไหลเกือบเป็นแนวตรง และเนื่องจากความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary layer) มีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะทางของท่อ จึงเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง เป็นที่ทราบกันดีว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) แต่เนื่องจากการไหลผ่านช่องไมโคร-แซนแนลส่วนมากจะเกิดการไหลแบบราบเรียบหรือแบบทรานซิชั่นเท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะหาวิธีในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ได้มากขึ้น การค้นหากลไกดังกล่าวได้เกิดขึ้นต่อมาในรูปแบบของงานจำนวนมากทั้งการศึกษาเชิงทฤษฎี การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการศึกษาเชิงการทดลอง

จากผลการทดลองของ Harms (1997) และ Harms et al. (1997) สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับด้วยของไหลสถานะเดียว ใช้น้ำกลั่นเป็นของไหลทำงาน ภายในท่อไมโครแซนแนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีความลึกต่างกัน โดยไมโครแซนแนลทำจากสารซิลิกอนความหนา 2 mm พบว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และความกว้างของท่อคงที่ ความดันตกที่เกิดขึ้นแปรผกผันกับความลึกของท่อ

Ambatipudi and Rahman (2000) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ทำการศึกษาตัวแปรทางเรขาคณิต (ความลึกและความกว้างของช่อง) ของหน้าตัดท่อ, จำนวนช่อง และอัตราการไหลของของไหลผ่านท่อไมโครแซนแนล พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลผ่านช่องไมโครแซนแนล ส่วนค่าตัวเลขนัสเซลท์ของ 1 ท่อ (Local Nusselt number) จะมีค่ามากขึ้นตามความยาวของท่อ และสรุปว่า การเพิ่มจำนวนช่องไมโครแซนแนลจะทำให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์ตามความยาวของท่อเพิ่มขึ้นด้วย

1.4.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสถานะเดียวในท่อคลื่นขนาดเล็ก

เป็นที่ทราบกันดีว่า การไหลของของไหลผ่านท่อคลื่น ทำให้เกิดการไหลทุติยภูมิ (Secondary-flow) หรือกระแสการหมุน (Dean vortices) ซึ่งเกิดจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เสริมให้เกิดการยึดและหดของกระแสการไหล อีกทั้งยังช่วยให้ของไหลเกิดการผสมกันได้ดียิ่งขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครแซนแนลที่มีลักษณะคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น

ดังที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ว่าการไหลแบบราบเรียบเป็นข้อจำกัดของการถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครแซนแนล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มการผสมกันของของไหลที่ไหลในท่อให้มากขึ้นโดยกลไกที่จะช่วยให้ของไหลเกิดการผสมกันมากขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนก็คือ Chaotic advection ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคของของไหลเดินทางอย่างยุ่งเหยิง (Chaos) โดยสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในการไหลแบบไม่คงตัวในสองมิติ (2-Dimensional unsteady flow) หรือการไหลแบบสามมิติ (3-Dimensional flow) ดังนั้นการทำให้เกิด Chaotic advection ในการไหลแบบราบเรียบและคงตัว (Steady laminar flow) จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์การไหล 3 มิติหลายชั้น (3-Dimensional multi-layer channels) หรือช่องทางการไหลที่มีรูปร่างซับซ้อนพอที่จะทำให้เกิดการยึดหดของกระแสการไหล

Schonfeld and Hardt (2004) ได้ทำการศึกษาก่อเกิด chaotic advection จากการไหล 2 มิติ ภายในท่อวางตัวแนวราบ โดยใช้ท่อที่ตัดจาก 1 ใน 3 ของวงกลม นำมาต่อกันโดยให้ส่วนโค้งของท่อเปลี่ยนเครื่องหมายไปตามจุดต่อ ซึ่งแล้วการวางลักษณะท่อเช่นนี้เปรียบได้กับท่อคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal wavy channel) โดยลักษณะโค้งของท่อจะเปลี่ยนเครื่องหมายบวก-ลบในทุกรอยต่อ ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าการผสมกันของอนุภาคในลักษณะที่เกิดขึ้นกับท่อคลื่นในงานดังกล่าว สามารถเกิดขึ้นได้กับท่อคลื่นรูปไซน์ได้เช่นกัน นอกจากนี้ การใช้ท่อคลื่นรูปไซน์ ที่สามารถกำหนดตัวแปรเช่น การเพิ่ม/ลดความสูงคลื่น (Amplitude) และการเพิ่ม/ลดความกว้างของท่อ ซึ่งจะช่วยในการจัดเรียงตัวท่อให้ชิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนให้มากขึ้น ท่อคลื่นในลักษณะนี้สามารถเรียงตัวได้ในแนวราบซึ่งง่ายต่อการผลิตมากกว่าท่อเกลียวสามมิติ (Helical tube) และสามารถทำให้เรียงตัวชิดกันในพื้นที่ที่จำกัดได้

Manglik et al. (2005) ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบและการพาความร้อนแบบบังคับในท่อไมโครแชนแนลคลื่น โดยใช้อากาศเป็นของไหล จากแบบจำลองสามมิติพบว่าเกิดกระแสการหมุนที่มีความสมมาตรขึ้นตามพื้นที่หน้าตัดของท่อ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนอย่างมาก แต่รวมไปถึงความดันตกที่เพิ่มขึ้นด้วย

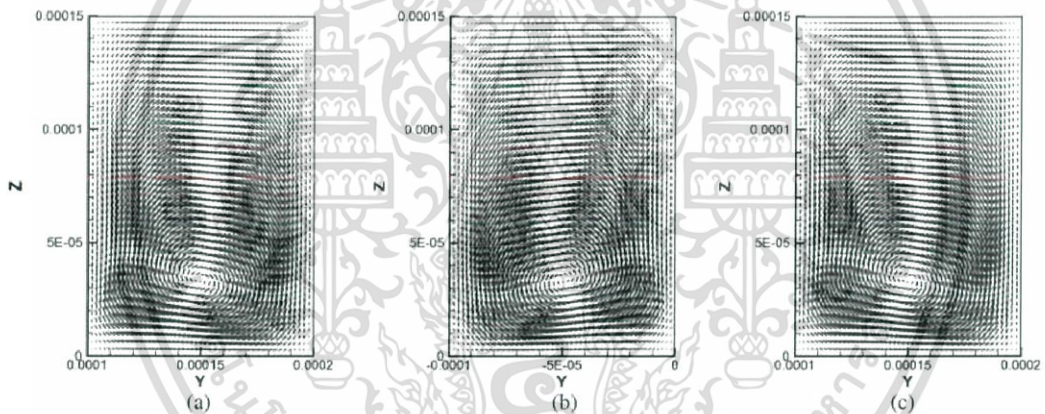
Fletcher et al. (2006) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่ (Fully developed laminar flow) และการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อคลื่นที่มีรูปร่างหน้าตัดต่างกัน พบว่าเกิดกระแสการหมุนและรูปแบบการไหลที่ซับซ้อนขึ้นในขณะที่ของไหลไหลผ่านท่อคลื่น เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกรไหลในท่อตรงที่กำหนดรูปร่างหน้าตัดเหมือนกัน จะพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าการไหลในท่อตรง ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันตก แล้วพบว่าความดันตกที่สูญเสียไปมีค่าน้อยกว่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้มาอย่างมาก

Sui et. al (2009) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยเพื่อศึกษาผลของความสูงคลื่น (Wavy amplitude) ของท่อไมโครแชนแนลคลื่นที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และศึกษาการเกิด chaotic advection โดยใช้เทคนิคเชิงตัวเลขที่เรียกว่า Poincare section เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคไร้มวล (Massless particle) ที่กระจายอยู่ในของไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของท่อไมโครแชนแนล โดยตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองท่อจะถูกกำหนดด้วยสมการ $y = A \cos(2\pi x / L)$ โดย A คือ ความสูงคลื่นของท่อ, L คือ ความยาวคลื่นของท่อใน 1 คาบ โดยมีการใช้ตัวแปรไร้หน่วยเพื่อกำหนดคุณลักษณะของท่อ คือ ค่าอัตราส่วนด้าน (Aspect ratio), ค่าความกว้างท่อไร้หน่วย ($\alpha_c = S_c / L$) โดย S_c คือ ความกว้างของท่อ และความสูงคลื่นสัมพันธ์ไร้หน่วย ($\gamma = A / L$) โดยแบบจำลองที่ใช้จะกำหนดเงื่อนไขการไหลคือ 1. สภาวะคงตัว (Steady state) 2. ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) 3. คุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด เป็นค่าคงที่ 4. ไม่มีการแผ่รังสีและการพาความร้อนตามธรรมชาติจากท่อไมโครแชนแนล ซึ่งแบบจำลองจะใช้ท่อ 10 หน่วยความคลื่น (10 คาบ) และค่าความสูงคลื่นสัมพันธ์ไร้หน่วยเท่ากับ 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15 และ 0.2 นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของตัวเลขนิตเซิลท์ และค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน (Friction factor) เพื่อหาค่าการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อน (E_{im}) และค่าการสูญเสียเนื่องจากความดันตก (E_f) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวเลขนิตเซิลท์และค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานในแบบจำลองระหว่างท่อคลื่นและท่อตรง พบว่าที่ค่าความสูงคลื่นมาก เช่น $\gamma = 0.125$ การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นไป และเมื่อเทียบอัตราส่วนค่าความดันตกพบว่ามีค่าน้อยกว่ามาก แสดงให้เห็นว่าการไหลในท่อคลื่นนั้น ให้ผลลัพธ์ที่พึงประสงค์มากกว่าการไหลในท่อตรง ยกเว้นในกรณี $\gamma = 0.2$ พบว่าแม้ว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมากตามตัวเลขเรย์โนลด์ แต่การสูญเสียจากความดันตกก็มีค่าที่สูงมากเช่นกัน จากรูปที่ 1.1 a, b, c แสดงการกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวท่อ คือ (a) $x = 5L$ (b) $x = 5.5L$ และ (c) $x = 6L$ เมื่อ $Re = 100$ จากรูปจะเห็นได้ถึงการก่อตัวของกระแสการหมุนทุติยภูมิ โดยรูปแบบการไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกันสำหรับทั้ง 3 ตำแหน่งตามความยาวท่อ แต่เริ่มมีการแสดงให้เห็นถึงการยึด-

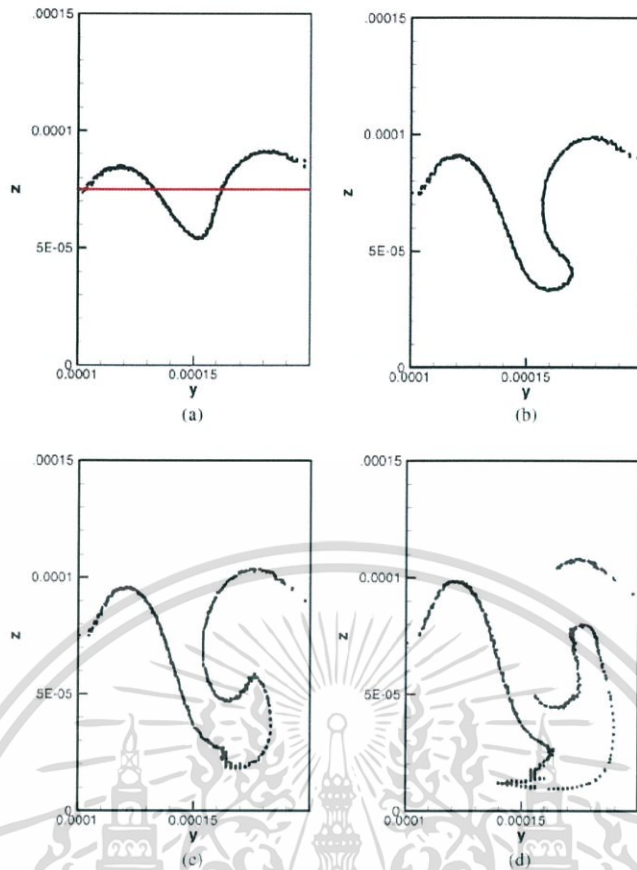
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หตุของกระแสการหมุน และจากรูปที่ 1.2 a, b, c, d แสดงการจำลองการหมุนวนของอนุภาคในของไหลบนพื้นที่หน้าตัดของท่อ พบว่าการกระจายของอนุภาคยังไม่ทั่วพื้นที่หน้าตัด จากรูปที่ 1.3 a, b, c ที่ $Re = 300$ การกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปแบบการไหลวนทุติยภูมิที่ตำแหน่ง x ต่างๆ ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้รูปแบบของกระแสการหมุนทุติยภูมิเริ่มมีความแตกต่างกันในทุกๆ ช่วงของท่อ และจากรูปที่ 1.4 a, b, c, d อนุภาคที่ลอยในของไหลกระจายตัวในพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น จากรูปที่ 1.5 a, b, c ที่ $Re = 500$ เวกเตอร์ความเร็วแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสการหมุนทุติยภูมิอย่างรุนแรงตามระยะของท่อและเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงกระแสการหมุนตามระยะทางอย่างเห็นได้ชัด และจากรูปที่ 1.6 a, b, c, d จากการใช้เทคนิค Poincare section เพื่อสังเกตอนุภาคที่ลอยในของไหลพบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวไปเกือบเต็มพื้นที่หน้าตัด แต่จากรูปที่ 1.7 และ 1.8 ที่ $Re = 300$ ที่ความสูงคลื่นของท่อลดลงการยืด-หดของกระแสการหมุนและการกระจายตัวของอนุภาครุนแรงน้อยกว่าแบบก่อนหน้า ดังนั้นการปรับความสูงคลื่นของท่อไมโครเซนแนลคลื่นและอัตราการใช้ของไหลจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้การผสมกันของของไหลดีขึ้น สรุปได้ว่า เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่ามากขึ้น อนุภาคมีการกระจายตัวไปทั่วพื้นที่หน้าตัด แสดงให้เห็นถึงการผสมกันอย่างดีของอนุภาคของของไหล และการเกิด Chaotic advection ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

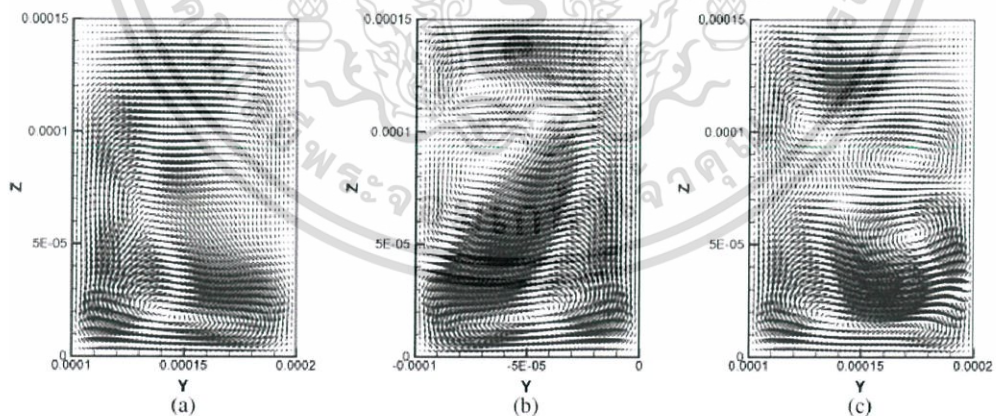


รูปที่ 1.1 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครเซนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 100$ ระยะทางตามแนวราบ $x =$ (a) $5L$ (b) $5.5L$ (c) $6L$ ความสูง $z = 0.00015$ nm เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ $x-y$ (Sui et. al, 2009)



รูปที่ 1.2 แบบจำลองเชิงตัวเลขของไมโครเซนแนลรูปคลื่น

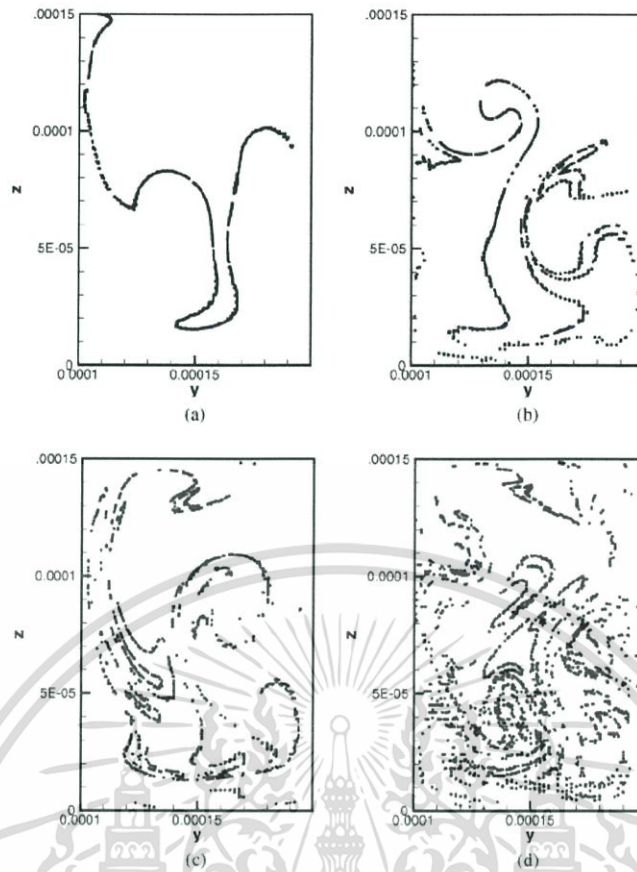
$\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 100$ ระยะทางตามแนวราบ (a) $6L$ (b) $7L$ (c) $8L$ (d) $9L$ ความสูง $z = 0.00015$ m เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)



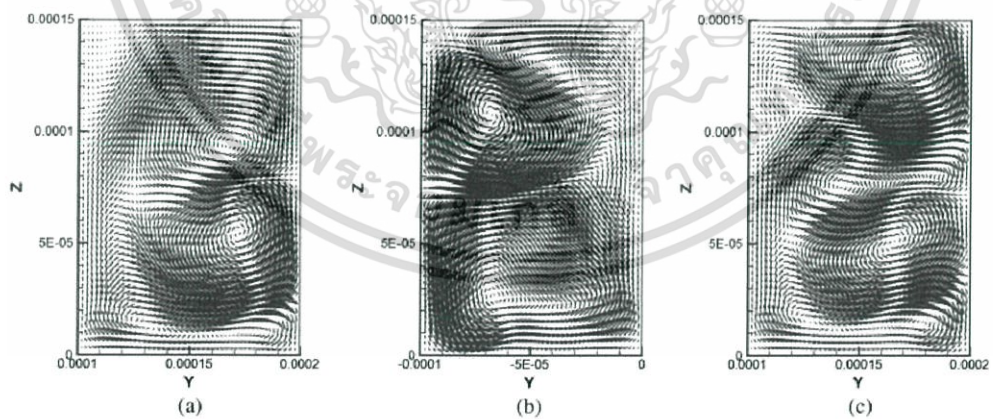
รูปที่ 1.3 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครเซนแนลรูปคลื่น

$\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 300$ ระยะทางตามแนวราบ $x =$ (a) $5L$ (b) $5.5L$ (c) $6L$ ความสูง $z = 0.00015$ m เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

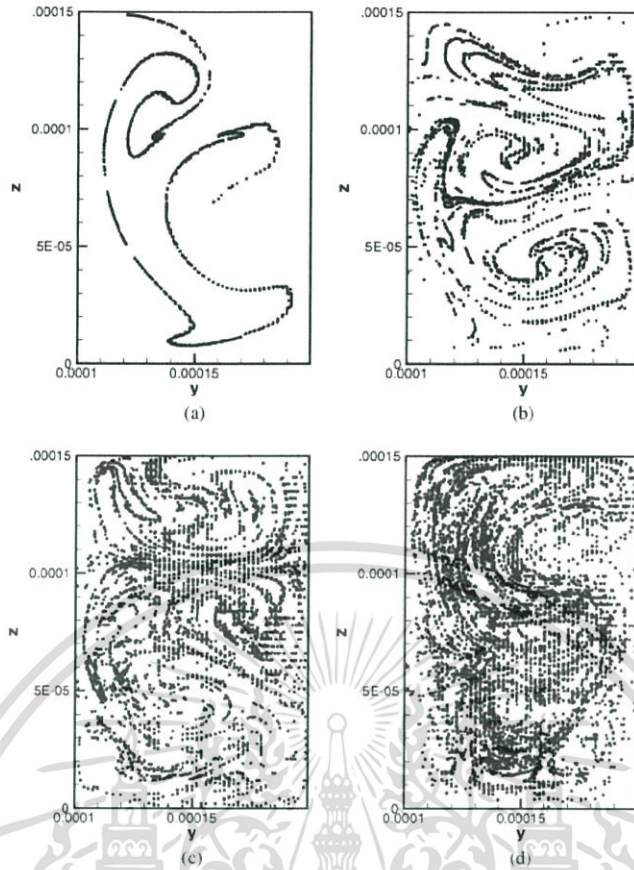


รูปที่ 1.4 แบบจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแชนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 300$ ระยะทางตามแนวราบ (a) 6L (b) 7L (c) 8L (d) 9L ความสูง $z = 0.00015$ m เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)



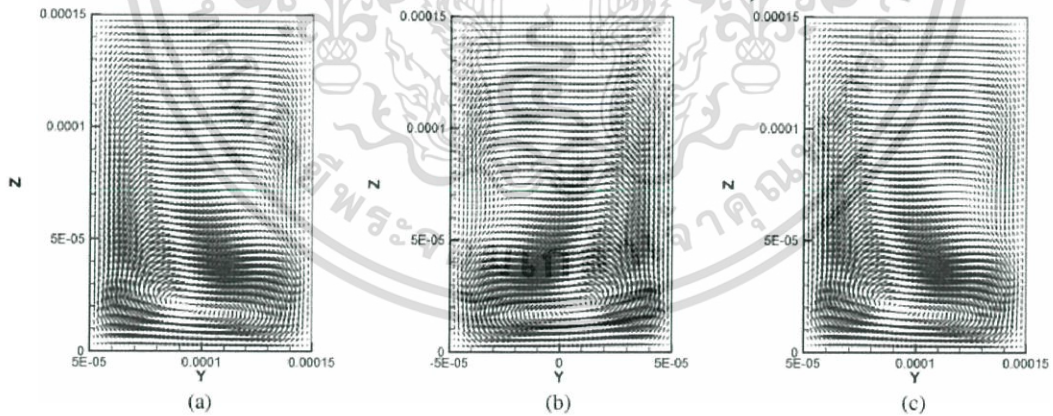
รูปที่ 1.5 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแชนแนลรูปคลื่น $\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 500$ ระยะทางตามแนวราบ $x =$ (a) 5L (b) 5.5L (c) 6L ความสูง $z = 0.00015$ m เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 แบบจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแชนแนลรูปคลื่น

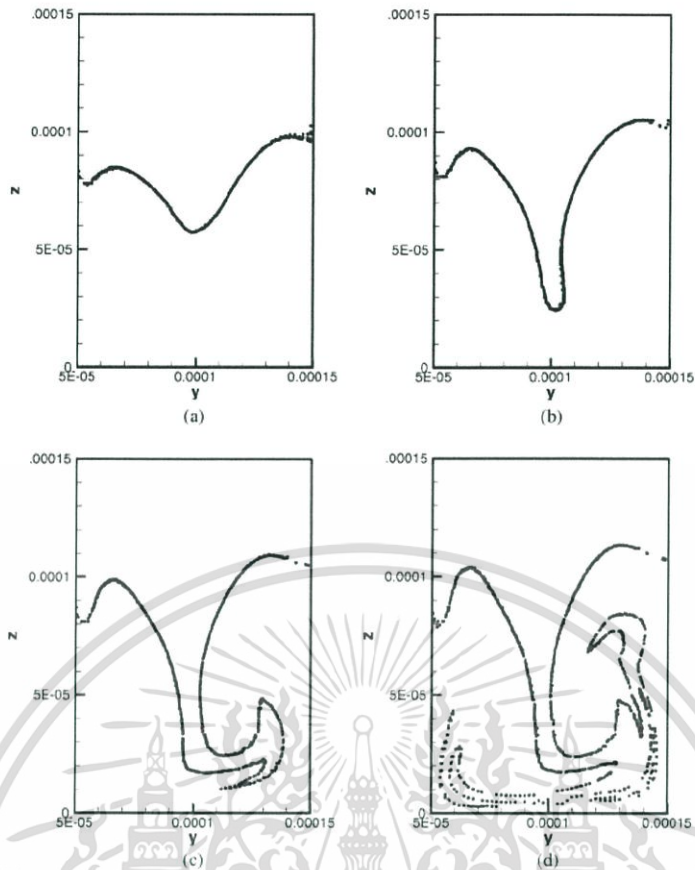
$\gamma = 0.1$ ที่ $Re = 500$ ระยะทางตามแนวราบ (a) 6L (b) 7L (c) 8L (d) 9L ความสูง $z = 0.00015$ m เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)



รูปที่ 1.7 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแชนแนลรูปคลื่น

$\gamma = 0.05$ ที่ $Re = 300$ ระยะทางตามแนวราบ $x =$ (a) 5L (b) 5.5L (c) 6L ความสูง $z = 0.00015$ m เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.8 Poincaré Section ของไมโครเซนแนลรูปคลื่น

$\gamma = 0.05$ ที่ $Re = 300$ ระยะทางตามแนวราบ (a) 6L (b) 7L (c) 8L (d) 9L ความสูง $z = 0.00015$ m เป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)

Mohammed et. al (2010) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันตกในท่อไมโครเซนแนลคลื่นที่ความสูงคลื่นที่ต่างกัน โดยให้ค่าความสูงคลื่นในช่วง 125 ถึง $500 \mu\text{m}$, ค่าตัวเลขเรย์โนลระหว่าง 100 ถึง 1000 โดยท่อไมโครเซนแนลทำจากอลูมิเนียมและใช้ของไหลเป็นน้ำ มีจำนวนท่อคลื่น 25 ท่อ มีการกำหนดเป็นตัวแปรความสูงคลื่นไร้หน่วย ($\alpha = A/L$) มีเท่ากับ $0, 0.0625, 0.125, 0.1875, 0.21875$ และ 0.25 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีค่าสูงขึ้นตามขนาดความสูงคลื่นของท่อ แต่มีค่าต่ำสุดที่ขนาด $\alpha = 0.25$ เนื่องจากการผสมกันที่แย่งระหว่างการเกิดการไหลทุติยภูมิ (Secondary flow) และผลของความสูงคลื่นที่มากเกินไป อีกทั้งยังพบว่าความดันตกในท่อแปรผันตรงกับตัวเลขเรย์โนลด์ ยิ่งไปกว่านั้นในท่อคลื่นความดันตกสูงกว่าท่อตรงและสูงสุดที่ความสูงคลื่น $\alpha = 0.25$ สรุปได้ว่าความหนาของชั้นของเขตของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางของท่อในท่อตรง ($\alpha = 0$) ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง และการที่ของไหลไหลผ่านท่อคลื่นที่มีลักษณะของท่อคลื่นรูปไซน์ ทำให้เกิดการกระแสวนหมุนวน เป็นผลให้เกิดการรบกวนชั้นขอบเขต ยิ่งไปกว่านั้นการไหลในท่อคลื่นทำให้การผสมกันของของไหลดีขึ้น เป็นผลทำให้การถ่ายเทความร้อนของท่อคลื่นมีค่ามากกว่าท่อตรง โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะแปรผันตรงกับความสูงคลื่นของท่อ อีกทั้งความดันตกและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานยังแปรผันตรงกับความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นอีกด้วย ดังนั้นในกรณีที่มีความสูงคลื่นมากที่ $\alpha = 0.25$ ความดันตกและแรงเสียดทานจึงมีค่ามากตาม ดังนั้นสำหรับการเลือกใช้ความสูงคลื่นของท่อในช่วง $\alpha = 0.0625$ ถึง $\alpha = 0.21875$ จึงเหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

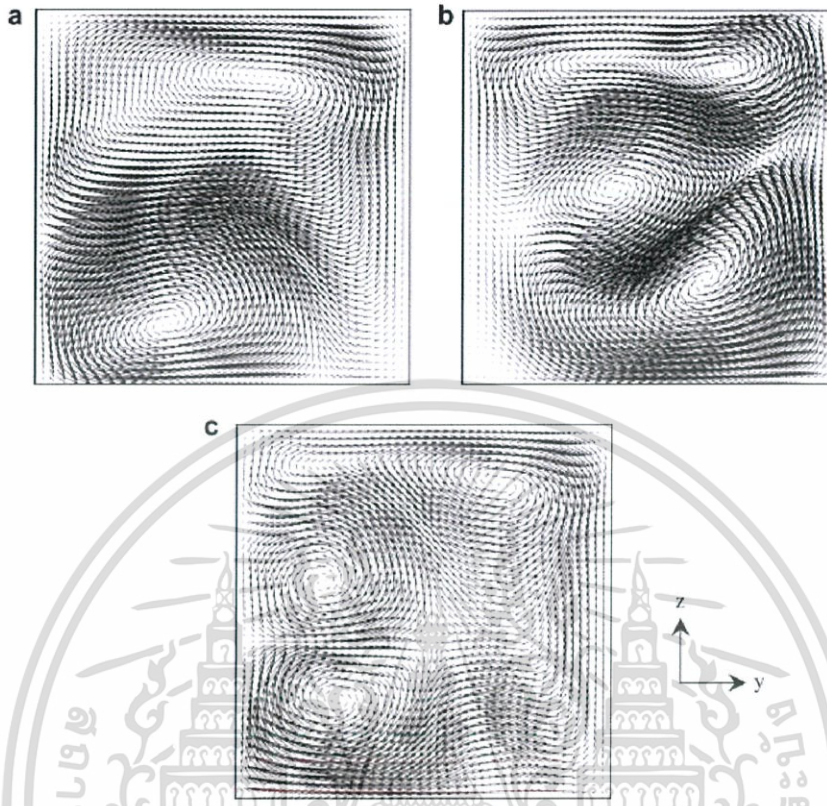
Sui et. al (2011) ได้ทำการทดลองคู่กับแบบจำลองเชิงตัวเลขอีกครั้ง เพื่อศึกษารูปแบบการไหล, ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อไมโครแชนแนลคลื่นรูปคลื่นไซน์หน้าตัดสี่เหลี่ยม ตามสมการ $y = A \cos(2\pi x / L)$ โดยในชุดการทดลองจะใช้ท่อไมโครแชนแนลคลื่นทำจากทองแดง ความกว้าง $205 \mu\text{m}$, ความลึก $404 \mu\text{m}$, ความยาวคลื่นท่อ 2.5 mm และเปลี่ยนความสูงคลื่นท่อระหว่าง $0-259 \mu\text{m}$ โดยขึ้นงานการทดลองทำด้วยทองแดงประกอบด้วยท่อไมโครแชนแนลคลื่นจำนวน 60-62 ท่อจัดเรียงตัวในแนวราบ โดยขึ้นงานที่จะทำการทดลองมีอยู่ด้วยกัน 3 ชั้น ต่างกันที่ความสูงคลื่นของท่อ คือ $0, 138, 259 \mu\text{m}$ พร้อมกับทำแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีลักษณะเดียวกัน จากนั้นเก็บข้อมูลตัวเลขนิตเซลท์และค่าแรงเสียดทานแล้วนำมาเปรียบเทียบกับท่อไมโครแชนแนลตรงที่มีขนาดเท่ากัน คำนวณค่าการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อน (E_{mn}) และค่าการสูญเสียเนื่องจากความดันตก (E_f) จากผลการทดลองและแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่า ท่อคลื่นทั้งสองความสูงคลื่น มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าในท่อตรงและสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงคลื่นของท่อ ส่วนค่าความเสียดทานซึ่งแปรผกผันกับตัวเลขเรย์โนลด์ในท่อคลื่น ค่าของแรงเสียดทานของท่อคลื่นมีค่ามากกว่าท่อตรง แต่เมื่อนำมาคำนวณค่าการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อน (E_{mn}) และค่าการสูญเสียเนื่องจากความดันตก (E_f) แล้วพบว่า ให้ผลลัพธ์ของท่อไมโครแชนแนลคลื่นดีกว่าท่อตรง เช่น ที่ $Re = 800$ ท่อความสูงคลื่น $138 \mu\text{m}$ แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น 41% ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 149% และเมื่อเพิ่มความสูงคลื่นของท่อเป็น $259 \mu\text{m}$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากความดันตกเพิ่มขึ้น 76% แต่ในขณะเดียวกันค่าการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 211%

แบบจำลองเชิงตัวเลขซึ่งพิจารณาผลของทั้งการพาความร้อนและการนำความร้อนของทองแดง ภายใต้เงื่อนไขดังนี้ 1. การไหลแบบคงตัว (Steady state) 2. ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) 3. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) 4. คุณสมบัติของของไหลบางประการคงที่ 5. ไม่มีผลของความหนืดของของไหล 6. ไม่มีผลของการแผ่รังสีและการพาความร้อนตามธรรมชาติจากไมโครแชนแนล พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อคลื่นสูงกว่าท่อตรงอย่างมากในกรณีที่พื้นที่หน้าตัดและความยาวรวมเท่ากัน การที่ขนาดของท่อที่ใช้ทำการทดลองและที่ใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลขมีความคล้ายคลึงกัน แต่ถึงอย่างไรก็มีความแตกต่างกันอยู่คือ ท่อที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบท่อเดี่ยวผนังด้านข้างขนานกัน จากการวิเคราะห์อย่างละเอียดพบว่า ความต่างของรูปทรงของท่อเพียงเท่านี้ยังไม่เพียงพอให้เกิดความต่างในเชิงคุณภาพของกลไกการไหลใดๆทั้งสิ้น จากความสูงคลื่นของท่อที่ต่ำมากยังพบอีกว่า กระแสการหมุนได้เกิดขึ้นตลอดช่วงของท่อและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบตลอดระยะทางจากรูปที่ 1.9 แสดงให้เห็นถึงสนามการไหล (Flow field) เพียงส่วนบนของหน้าตัดในช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลายของท่อตามลำดับ ของท่อความยาวคลื่น $A = 259 \mu\text{m}$ ที่ $Re = 300$ จากท่อ $A = 259 \mu\text{m}$ ที่ $Re = 600$ พบว่า อนุภาคกระจายไปทั่วพื้นที่หน้าตัดจนเกือบเต็ม แสดงให้เห็นถึงการเกิด chaotic advection ความดันตกที่สูญเสียไปเมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนที่ได้มาแล้วถือว่าอยู่ในสัดส่วนที่น้อยมาก สอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา รวมไปถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

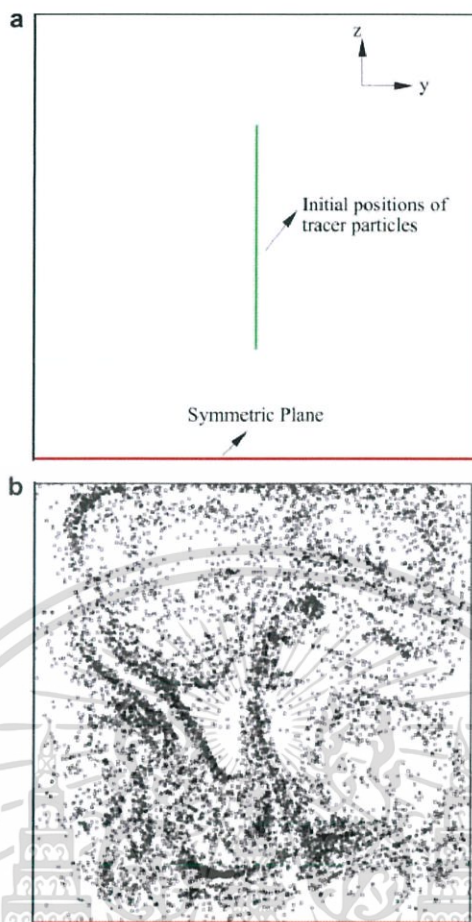
มวลที่ลอยในของไหลที่เรียกว่าเทคนิค Poincare Section ตามพื้นที่หน้าตัดตามความยาวของท่อ ตามรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.9 เวกเตอร์ความเร็วบนพื้นที่หน้าตัดของไมโครแชนแนลรูปคลื่น

ความสูงคลื่น $A = 259 \mu\text{m}$ ที่ $\text{Re} = 600$ ระยะทางตามแนวราบ $x =$ (a) $5L$ (b) $5.5L$ (c) $6L$
 ด้านล่างของหน้าตัดของแบบจำลองถือว่าเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y
 (Sui et. al, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.10 แบบจำลองการไหลโดยการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคลอยในหน้าตัดของไมโครแชนแนล รูปคลื่น $A = 259 \mu\text{m}$ ที่ $\text{Re} = 600$

(a) แสดงถึงจุดเริ่มต้นของอนุภาคที่จะทำการติดตาม (เส้นเขียว) (b) เส้นแกนสมมาตรของหน้าตัด ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดโดยให้สมมาตรตามระนาบ x-y (Sui et. al, 2009)

สรุปได้ว่า พัฒนาการของกระแสการหมุน และนำไปสู่ Chaotic advection เกิดจากเหตุผลหลัก 2 ประการ คือ 1. สำหรับท่อคลื่นรูปไซน์ดังเช่นการทดลองที่ผ่านมา ส่วนโค้งของท่อได้เกิดการเปลี่ยนเครื่องหมายบวกและลบ ตามระยะทางของการไหลเป็นผลให้แรงหนีศูนย์กลางเกิดการเปลี่ยนทิศ เป็นเหตุให้กระแสการหมุนเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง ยืด หด และพัฒนาจนเกิดการพาแบบยุ่งเหยิงขึ้น 2. ลักษณะของท่อที่ประกอบด้วยหน่วยความโค้งเพียงแค่ 10 หน่วย (10 คาบ) ทำให้การไหลอาจจะยังอยู่ในช่วงการพัฒนา (Developing flow regime) เท่านั้น ส่งผลให้เกิดการพัฒนาของกระแสการหมุนได้อีกทางหนึ่ง

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเนื่องจากการไหลในท่อไมโครแชนแนลนั้นส่วนใหญ่เป็นแบบราบเรียบ ดังนั้นการที่จะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นต้องขึ้นอยู่กับการผสมกันของของไหลภายในท่อเป็นหลัก อีกทั้งเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นไปผลของการไหลในท่อคลื่นรูปไซน์ กระแสการหมุนทำให้เกิดการรบกวนของอนุภาคของไหลซึ่งเป็นผลทำให้เกิด Chaotic advection จึงเป็นกลไกหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครแชนแนลโค้งรูปคลื่น ซึ่งเป็นความได้เปรียบกว่าการไหลในท่อไมโครแชนแนลตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ

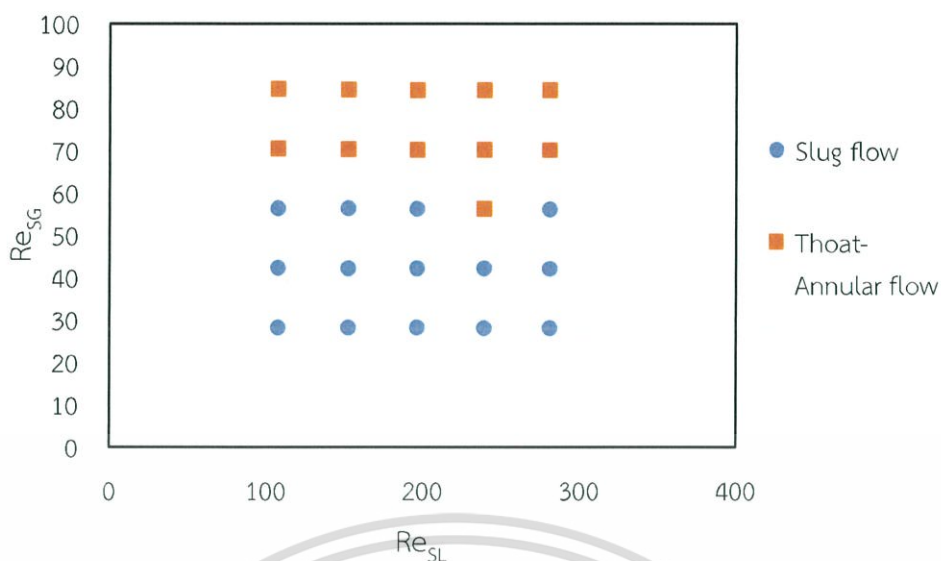
Triplett et al. (1999) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ (น้ำ-อากาศ) ในท่อกลมขนาดเล็กแนวนอน เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 1.1 และ 1.45 mm และในท่อครึ่งสามเหลี่ยมมุมมนขนาดเล็กแนวนอน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 1.09 และ 1.49 mm โดยความเร็วในการไหลตามผิวของอากาศและน้ำอยู่ในช่วง 0.02-80 และ 0.02-8 m/s ตามลำดับ จากการทดลองสรุปได้ว่า การไหลภายในท่อกลมและท่อครึ่งสามเหลี่ยมมุมมนมีรูปแบบการไหลที่เหมือนกันอยู่ 5 รูปแบบ คือ bubbly flow, slug flow, churn flow, slug-annular flow และ annular flow

Saisorn and Wongwises (2015) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหล, สัดส่วน ช่องว่าง และความดันลดของการไหลของของไหลสองสถานะ (อากาศ-น้ำ) ในท่อกลมขนาดเล็กแนวตั้ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 mm ยาว 320 mm จากผลการทดลองพบว่า รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะในท่อกลมขนาดเล็กแนวตั้ง มีรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบดังนี้ slug flow, throat-annular flow, churn flow, annular flow และ annular-rivulet flow และรูปแบบการไหลแบบ slug flow นั้น จะถูกทำให้เสียรูประหว่างการไหลขึ้นของของไหลผสม ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของกระสุน (bullet shape) ที่พบในท่อแนวนอน และการไหลขึ้นในท่อแนวตั้งให้ค่าความดันลดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลในท่อแนวนอน

Wei et al. (2017) ได้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของของไหลสองสถานะในท่อสี่เหลี่ยมแนวตั้งที่มีทิศทางการไหลขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบรูปแบบการไหล ระหว่างท่อที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด $25 \times 2 \text{ mm}^2$ และขนาด $25 \times 5 \text{ mm}^2$ พบว่า รูปแบบการไหลพื้นฐานอยู่ 4 รูปแบบ คือ bubbly flow, slug flow, churn-turbulent flow และ annular flow จากนั้นเมื่อให้ความเร็วของของไหลคงที่และทำการเพิ่มความเร็วของก๊าซมากขึ้นพบว่า ได้รูปแบบการไหลเป็นดังต่อไปนี้ bubbly flow, slug flow, churn-turbulent flow และ annular flow ตามลำดับ

1.4.3.1 รูปแบบการไหลในท่อตรง

จากการทดลองของ ปฐม เอี่ยมศิลป์ชัย(2018)พบว่า มีรูปแบบการไหลเกิดขึ้นในไมโครเซนแนลท่อตรงทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ การไหลแบบ throat-Annular flow และ การไหลแบบ Slug flow ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 1.12-1.13 พบว่าจะเกิดการไหลแบบ throat-Annular flow ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของก๊าซ (gas superficial Reynolds number, Re_{SG}) เท่ากับ 56, 70 และ 85 ตามลำดับ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของของเหลว (liquid superficial Reynolds number, Re_{SL}) เท่ากับ 107-281 และจะเกิดการไหลแบบ Slug flow ที่ Re_{SG} เท่ากับ 28, 42 และ 56 ตามลำดับ ที่ Re_{SL} เท่ากับ 107-281 เนื่องจากการไหลแบบ slug flow จะเกิดที่ Re_{SG} ต่ำ ส่วนการไหลแบบ Annular flow จะเกิดที่ Re_{SG} สูง

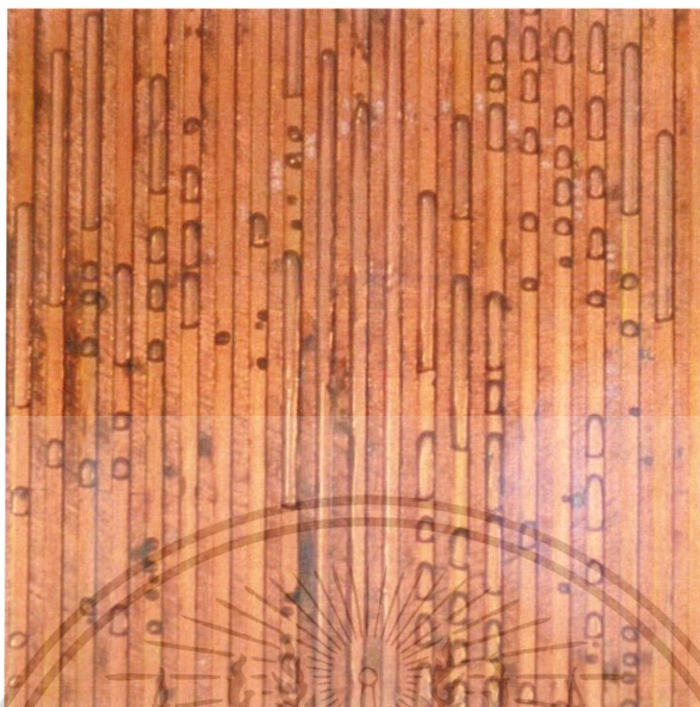


รูปที่ 1.11 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะ น้ำ-อากาศ ในท่อตรง (ปฐม เอี่ยมศิลป์ชัย, 2018)



รูปที่ 1.12 แสดงรูปแบบการไหลแบบ Throat-Annular flow (ปฐม เอี่ยมศิลป์ชัย, 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.13 แสดงรูปแบบการไหลแบบ slug flow (ปฐม เอี่ยมศิลป์ชัย, 2018)

1.4.4 การถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะในท่อขนาดเล็ก

Bao et al. (2000) ทำการทดลองการไหลของของไหลสองสถานะ (อากาศ-น้ำ) ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือด ภายในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.95 mm โดยความเร็ว ในการไหลตามผิวของอากาศและน้ำอยู่ในช่วง $0.1\text{-}50$ และ $0.08\text{-}0.5 \text{ m/s}$ ตามลำดับ ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผนังอยู่ในช่วง $3\text{-}58 \text{ kW/m}^2$ จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

Hetsroni et al. (2009) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครแชนแนลหน้าตัดสามเหลี่ยมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ $100 \mu\text{m}$ วางตัวขนานกันจำนวน 21 ท่อ โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) และอากาศเป็นของไหลทำงาน จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อความเร็ว ของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

Betz และ Attinger (2010) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาวิธีการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในท่อไมโครแชนแนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดพื้นที่หน้าตัดต่อเท่ากับ $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ ใช้น้ำ เป็นของไหลทำงานสำหรับการไหลสถานะเดียว และใช้ อากาศ-น้ำ เป็นของไหลผสมสำหรับการไหลสองสถานะ โดยกำหนดให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ slug flow เพียงอย่างเดียวในการทดลอง จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบการไหลแบบ slug flow ให้การถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าการไหลแบบสถานะเดียวเพิ่มขึ้นถึง 140% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของน้ำที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Choo และ Kim (2011) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะ (อากาศ-น้ำ) ในท่อไมโครแชนแนล ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือด เพื่อศึกษาผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีต่อตัวเลขนัสเซิลท์ โดยทำการทดลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทั้งหมด 4 ค่า ดังนี้ 140, 222, 334 และ 506 μm ที่ความเร็วในการไหลตามผิวของอากาศและน้ำอยู่ในช่วง 1.24-40.1 และ 0.57-2.13 m/s ตามลำดับ กำหนดให้พลักซ์ความร้อนคงที่ พบว่า ค่าตัวเลขนัสเซิลท์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศมีเพิ่มขึ้นสำหรับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่กว่าคือ 506 และ 334 μm แต่จะพบว่า ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ลดลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นสำหรับท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กคือ 222 และ 140 μm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลของของไหลสถานะเดียว (Single-phase fluid flow)

2.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของของไหลสถานะเดียว

การจำแนกรูปแบบของการไหลของของไหลสถานะเดียวจะใช้ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds-number) สำหรับตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2300 จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4000 จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, U คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราการไหลของของไหล, μ คือ ความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_m และ D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4(H_f \times S_c)}{(2H_f + 2S_c)} \quad (2.2)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อไมโครแชนแนล P คือ เส้นรอบรูปเปียก H_f คือ ความสูงของครีป S_c คือ ความกว้างของไมโครแชนแนล และการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทำงาน (T_m) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (2.3)$$

เมื่อ T_{in} และ T_{out} คือ อุณหภูมิของของไหลทำงานที่ทางเข้าและทางออก ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การไหลของของไหลสองสถานะ (Two-phase fluid flow)

2.2.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของของไหลสองสถานะ

ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของก๊าซ (Superficial gas Reynolds number)

$$\text{Re}_{SG} = \frac{\rho_G J_{SG} D_h}{\mu_G} \quad (2.4)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส, J_{SG} คือ ความเร็วผิวของแก๊ส, μ_G คือ ความหนืดของแก๊สที่อุณหภูมิเฉลี่ย

ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของของเหลว (Superficial liquid Reynolds number)

$$\text{Re}_{SL} = \frac{\rho_L J_{SL} D_h}{\mu_L} \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ_L คือ ความหนาแน่นของของเหลว, J_{SL} คือ ความเร็วผิวของของเหลว, μ_L คือ ความหนืดของของเหลวที่อุณหภูมิเฉลี่ย

ความเร็วผิว (Superficial velocity, J) คือ ความเร็วของของไหลนั้นๆ เมื่อพิจารณาว่าของไหลสถานะนั้นไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของของไหลทุกสถานะรวมกัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ความเร็วผิวของแก๊ส (Superficial velocity of gas, J_{SG})

$$J_{SG} = \frac{G_G}{\rho_G} = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G A} \quad (2.6)$$

ความเร็วผิวของของเหลว (Superficial velocity of liquid, J_{SL})

$$J_{SL} = \frac{G_L}{\rho_L} = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L A} \quad (2.7)$$

เมื่อ \dot{m}_G คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส, \dot{m}_L คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว, A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของของไหลทุกสถานะรวมกัน

คุณภาพเชิงมวล x สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของของไหลสองสถานะ (Two – phase flow Reynolds number)

$$\text{Re}_{TP} = \frac{G_{TP} D_h}{\mu_{TP}} \quad (2.9)$$

เมื่อ G_{TP} คือ ฟลักซ์มวลของของไหลสองสถานะ และ μ_{TP} คือ ความหนืดของของไหลสองสถานะ ตามสมการของ McAdams et al. (1942) สามารถหาได้ดังสมการ

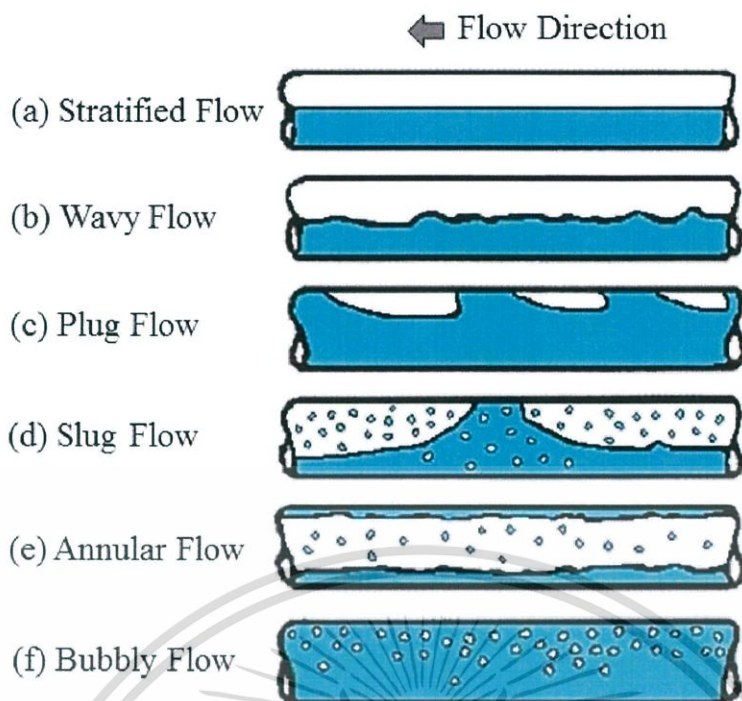
$$G_{TP} = G_L + G_G = \rho_L J_{SL} + \rho_G J_{SG} \quad (2.10)$$

$$\mu_{TP} = \left[\frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

2.2.2 รูปแบบการไหลแบบสองสถานะและแผนผังที่รูปแบบการไหล (Flow visualization)

รูปแบบการไหลต่างๆ ของไหลสองสถานะ ของเหลวและก๊าซภายในท่อแนวนอน สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.4 โดยสามารถแบ่งเป็น 6 รูปแบบการไหล ดังนี้

1. Stratified flow มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยแก๊สจะอยู่บนและของเหลวอยู่ล่าง โดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะราบเรียบ ดังรูปที่ (a)
2. Wavy flow มีลักษณะของเหลวและแก๊สแยกชั้นกัน โดยแก๊สจะอยู่บนและของเหลวอยู่ล่าง โดยผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจะเป็นคลื่น ดังรูปที่ (b)
3. Plug flow เกิดจากการรวมตัวกันของฟองแก๊สขนาดเล็กหลายๆลูกของ Bubbly flow ทำให้เกิดเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ขึ้นและยาวขึ้น ดังรูปที่ (c)
4. Slug flow เกิดเมื่อคลื่นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นของแก๊สและของเหลวใน Wavy flow เกิดสูงขึ้นจนยอดคลื่นถึงผนังด้านบนของท่อ ดังรูปที่ (d)
5. Annular flow เป็นลักษณะของเหลว ไหลเป็นชั้นฟิล์มบางแหวนรอบผนังท่อ โดยความหนาของชั้นฟิล์มของของเหลวด้านล่างจะหนากว่าชั้นบน และอาจมีละอองของของเหลวเคลื่อนที่กระจายอยู่ในแก๊สซึ่งเคลื่อนที่อยู่บริเวณแกนกลางของท่อ ดังรูปที่ (e)
6. Bubbly flow มีลักษณะการไหลเป็นฟองแก๊สขนาดเล็ก ไหลอยู่ค่อนไปทางส่วนบนของท่อเนื่องจากฟองแก๊สมีความหนาแน่นน้อยกว่าจึงลอยตัวขึ้น ดังรูปที่ (f)



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการไหล แก๊ส-ของเหลว ภายในท่อกลมแนวนอน (Milad Darzi)

2.3 การถ่ายเทความร้อน

ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) คือ ตัวแปรไร้มิติของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hD_h}{k_f} \quad (2.12)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล, D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก และ k_f คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_m

ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล (h) เพื่อหาค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย (Nu) จะสมมติให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากปลายครีบ (Adiabatic fin tip) เนื่องจากแผ่นพลาสติกโพลีคาร์บอเนตที่ติดตั้งอยู่ทางด้านบนของครีบระบายความร้อนมีค่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำมาก เนื่องจากไม่ทราบค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบ (η_f) จึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำ (Iteration process) ซึ่งวิธีการนี้ถูกนำเสนอโดย Lee et al. (2005) โดยขั้นตอนกระบวนการทำซ้ำเริ่มต้นจากการสมมติค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบเป็น 100% แล้วนำไปแทนลงในสมการที่ 2.13 พร้อมกับค่าที่ได้จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ได้ไปแทนลงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.18 เพื่อหาค่าตัวแปร m จากนั้นนำค่าตัวแปร m ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 2.17 เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบ นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่สมมติไว้ หากค่าทั้งสองมีค่าไม่เท่ากันให้ทำการสมมติค่าขึ้นใหม่ และทำตามขั้นตอนเดิม จนกว่าค่าทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลมีดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{Q}}{N(A_{cb} + 2A_{cs}\eta_w)(T_w - T_m)} \quad (2.13)$$

$$A_{cb} = S_c \times L_t \quad (2.14)$$

$$A_{cs} = 2(H_f \times L_t) \quad (2.15)$$

เมื่อ N คือ จำนวนช่องไมโครแชนแนลทั้งหมด, A_{cb} คือ พื้นที่ด้านล่างที่ใช้ในการพาความร้อนในแต่ละช่อง, A_{cs} คือ พื้นที่ด้านข้างที่ใช้ในการพาความร้อนในแต่ละช่อง, η_w คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบ, T_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่พื้นผิวของไมโครแชนแนล ซึ่งหาค่าได้จากวิธีการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolation), T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทำงาน, L_t คือ ความยาวทั้งหมดของแต่ละช่อง และ \dot{Q} คือ ปริมาณความร้อนที่ของไหลได้รับ ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \rho c_p \dot{V} (T_{out} - T_{in}) \quad (2.16)$$

เมื่อ \dot{V} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลสามารถวัดได้จากการทดลอง โดยใช้เครื่องมือวัดการไหล (Flow meter), ρ และ c_p คือ ความหนาแน่นของของไหลและค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ซึ่งค่าทั้งสองคำนวณได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล (T_m)

ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีบ (η_w) ซึ่งสมมติให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากปลายครีบ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_w = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f} \quad (2.17)$$

เมื่อ H_f คือ ความสูงของครีบ และ m คือ ค่าคงที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$m^2 = \frac{2h}{k_{cu} S_f} \quad (2.18)$$

เมื่อ k_{cu} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองแดง และ S_f คือ ความหนาของครีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสถานะเดียว

2.3.1.1 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสถานะเดียวในท่อตรง

Sieder-Tate ได้นำเสนอสมสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยในกรณีที่มีการไหลแบบราบเรียบ ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือดที่ฟลักซ์ความร้อนพื้นผิวคงที่ไว้ (Constant- surface heat flux) ดังต่อไปนี้

$$Nu = 1.86(RePr D / L)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2.19)$$

$$0.7 \leq Pr \leq 16700$$

เมื่อ Pr คือ ตัวเลขพรันด์เทิล, μ_f คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของเหลวที่อุณหภูมิเฉลี่ยของไหล μ_w คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของเหลวที่อุณหภูมิพื้นผิว

2.3.1.2 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสถานะเดียวในท่อคลื่น

Dravid et al. ได้นำเสนอสมสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยในกรณีที่มีการไหลแบบราบเรียบ ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือดที่ฟลักซ์ความร้อนพื้นผิวคงที่ไว้ (Constant- surface heat flux) ดังต่อไปนี้

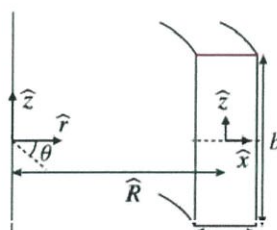
$$Nu = [0.65\sqrt{De} + 0.76] Pr^{0.175} \quad (2.20)$$

$$5 \leq Pr \leq 175, 50 \leq De \leq 2000$$

เมื่อ \sqrt{De} คือ ตัวเลขดีน(Dean number) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$De = \sqrt{2} Re \sqrt{\frac{D_h}{2R_c}} \quad (2.21)$$

เมื่อ R_c คือ รัศมีความโค้ง



รูปที่ 2.5 แสดงรัศมีความโค้งของท่อรูปคลื่น (Philip E. Haines et. al)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะ

2.3.2.1 การทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อตรง

Chuanshuai Dong & Takashi Hibiki ได้นำเสนอสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยในกรณีที่มีการไหลสองสถานะ ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือด ดังต่อไปนี้

$$Nu_{1\phi} = 1.86(\text{Re}_f \text{Pr}_f D/L)^{1/3} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2.22)$$

$$\frac{Nu_{2\phi}}{Nu_{1\phi}} = (1-\alpha)^{0.257} (1 + 4.27 X^{-0.697}) \quad (2.23)$$

เมื่อ $Nu_{1\phi}$, $Nu_{2\phi}$ คือค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของของไหลสถานะเดียว, สองสถานะ ตามลำดับ, α คือ สัดส่วนช่องว่าง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ และ X คือ ตัวแปรไร้มิติของ Lockhart–Martinelli ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{1}{1 + (S \frac{(1-x)\rho_G}{x \rho_L})} \quad (2.24)$$

$$X = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_G} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (2.25)$$

2.3.3 ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance index)

Hashemi et al. (2012) ได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance index, PI) ไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$PI = \frac{Nu_S / Nu_L}{\Delta P_S / \Delta P_L} \quad (2.26)$$

เมื่อ Nu_S คือ ตัวเลขนัสเซิลท์ของของไหลในท่อคดเคี้ยว, Nu_L คือ ตัวเลขนัสเซิลท์ของของไหลในท่อตรง, ΔP_S คือ ความดันตกของการไหลในท่อคดเคี้ยว, ΔP_L คือ ความดันตกของการไหลในท่อตรง

หากค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าหนึ่งจะเป็นการบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันตก ซึ่งหมายความว่า เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ แต่หากสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าหนึ่งจะเป็นการบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันตก ซึ่งหมายความว่า เป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วงจรการทำงานและรายละเอียดของชุดทดลอง

3.1.1 คุณสมบัติของท่อคลื่นขนาดเล็ก

ไมโครเซนแนลลิตซิงค์ดังรูปที่ 2.1 ความกว้างของไมโครเซนแนลคองที่ (S_c) เท่ากับ $800 \mu m$ ความลึก (H_f) เท่ากับ $500 \mu m$ จำนวน 26 ช่อง ระยะห่างของแต่ละช่องซึ่งเป็นความกว้างของครีบ (S_r) เท่ากับ $500 \mu m$ แกนกลางของไมโครเซนแนลในแนวราบถูกกำหนดด้วยสมการ

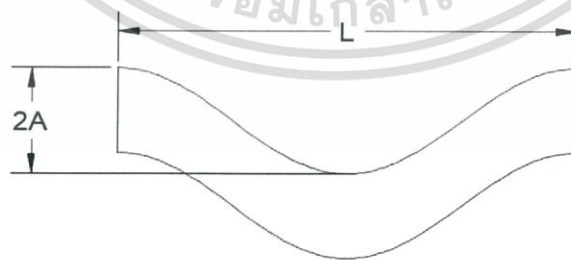
$$y = A \cos(2\pi x / L) \quad (3.1)$$

เมื่อ A คือ ความสูงคลื่น (Wavy amplitude) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ x คือ ระยะตามแกนระดับ และ L คือ ความยาวคลื่น (Wavelength) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ ดังรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.3 แสดงไมโครเซนแนลคลื่น 1 ช่อง ความยาวรวม (L_f) เท่ากับ 40 mm ประกอบด้วย 10 หน่วยความโค้ง (Wavy Unit) หรือ 10 คาบ

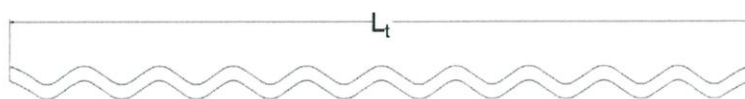


รูปที่ 3.1 ไมโครเซนแนลด้านหน้าและพารามิเตอร์



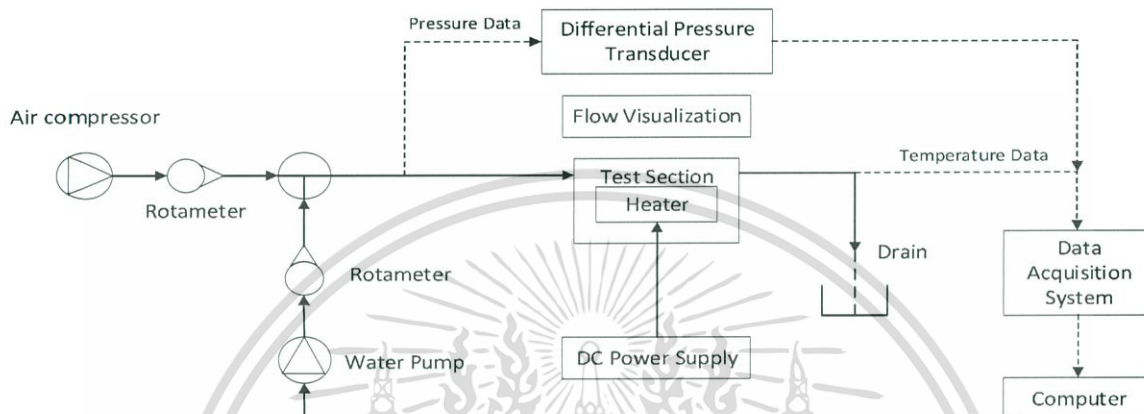
รูปที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสมการกำหนดไมโครเซนแนลคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะของไมโครแชนแนลคลื่น 1 ช่อง

3.1.2 วงจรการทำงานของชุดทดลอง



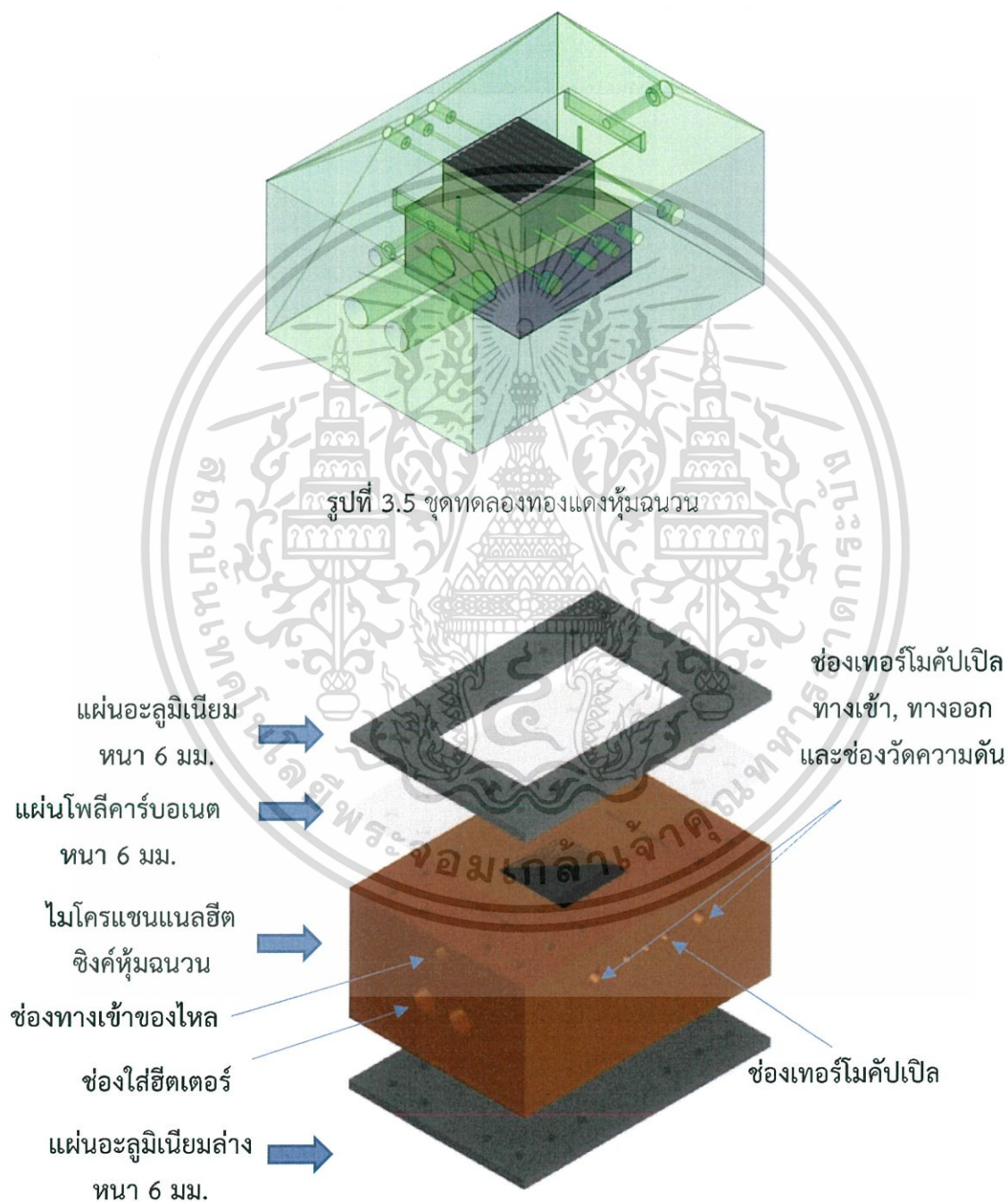
รูปที่ 3.4 วงจรการทำงานของชุดทดลอง

จากรูปที่ 3.4 แสดงวงจรการทำงานของชุดทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ โดยเริ่มต้นจากปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) ดูดจ่ายของไหล (น้ำกลั่น) จากถังเก็บน้ำก่อนเข้าสู่ชุดทดลองและไมโครแชนแนล ของไหลจะผ่านโรตاميเตอร์ที่สามารถปรับอัตราการไหลและแสดงข้อมูลอัตราการไหลขณะนั้นได้ ในส่วนของการทดลองการไหลแบบสองสถานะ จะมีการใช้ปั๊มลมจ่ายอากาศเข้าไปรวมกันที่จุดผสมของไหลตัวที่ (T-mixer) ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ชุดทดลอง ซึ่งในส่วนของชุดทดลอง (Test section) จะประกอบด้วยไมโครแชนแนลฮีตซิงค์ (Microchannels heat sink) ที่ทำจากทองแดง อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) วัดอุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าและทางออกของไมโครแชนแนล วัดอุณหภูมิภายในทองแดงอีก 6 จุด และฮีตเตอร์รับไฟฟ้ากระแสตรง ติดตั้งอยู่ทางด้านล่างของไมโครแชนแนล หลังจากทีของไหลเข้าสู่ชุดทดลองแล้วและก่อนเข้าสู่ไมโครแชนแนลที่ทำจากทองแดงจะมีการเก็บข้อมูลความดันขาเข้าจากอุปกรณ์วัดความดัน (Pressure transducer) และอุณหภูมิของไหลขาเข้า หลังจากของไหลผ่านส่วนของไมโครแชนแนลแล้วจะมีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิขาออกของของไหลเพื่อนำข้อมูลความดันและอุณหภูมิทั้งหมดเข้าสู่ระบบรวบรวมข้อมูล (Data acquisition system) และข้อมูลความดันและอุณหภูมิที่ได้จะถูกแสดงในคอมพิวเตอร์ของไหลที่ผ่านชุดทดลองจะออกสู่ถังรองน้ำเพื่อทำการลดอุณหภูมิแล้วเพื่อกลับมาใช้ในการทดลองต่อไป รูปแบบการไหลต่างๆของการไหลสองสถานะจะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 รายละเอียดของชุดทดลอง

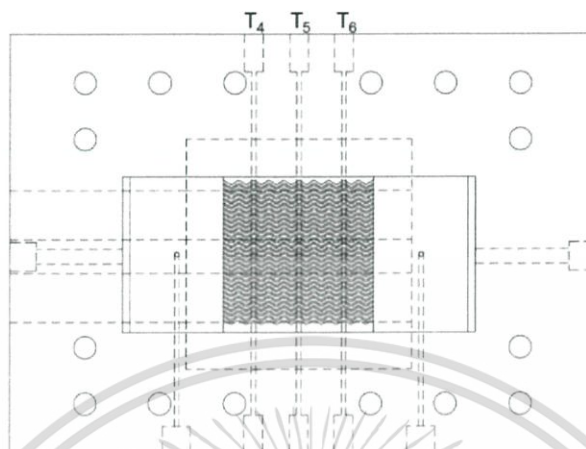
ชุดทดลองจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนไมโครเซนแนลทองแดง และส่วนของฉนวนอีพอกซีเรซิน ซึ่งฉนวนเรซินจะมีการออกแบบให้มีช่องทางเข้าและออกไมโครเซนแนลของของไหล ช่องของฮีตเตอร์ รวมไปถึงส่วนที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ (เทอร์โมคัปเปิล) และส่วนวัดความดัน (ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน)



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

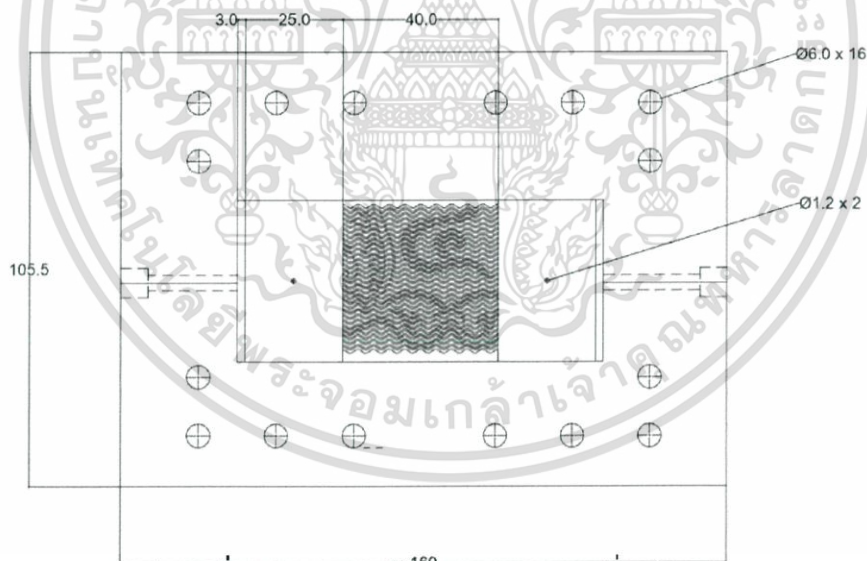
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดอุณหภูมิและความดันมีตำแหน่งที่วัดดังรูปที่ 3.4 โดยในส่วนการวัดอุณหภูมิจะมีการวัดอุณหภูมิของไหลทางเข้า-ออก และอีก 6 ตำแหน่งบนและล่างของไมโครเซนแนลทองแดง ในส่วนการวัดความดันจะมีการวัดที่ตำแหน่งทางทางเข้าของไมโครเซนแนล



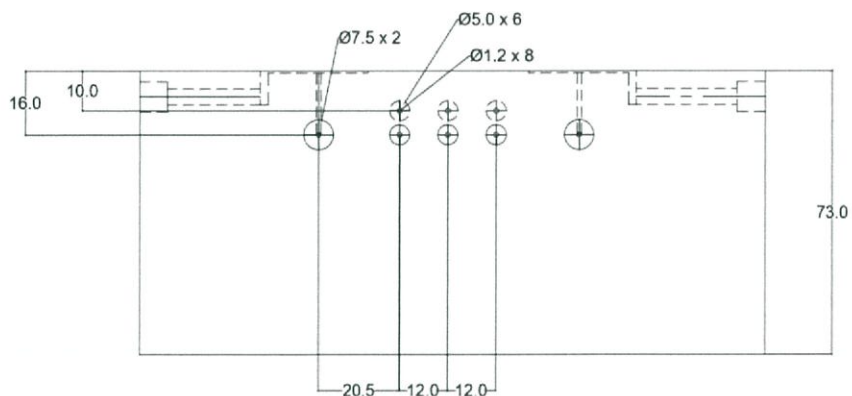
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและความดัน

3.1.3.1 ฉนวนเรซิน

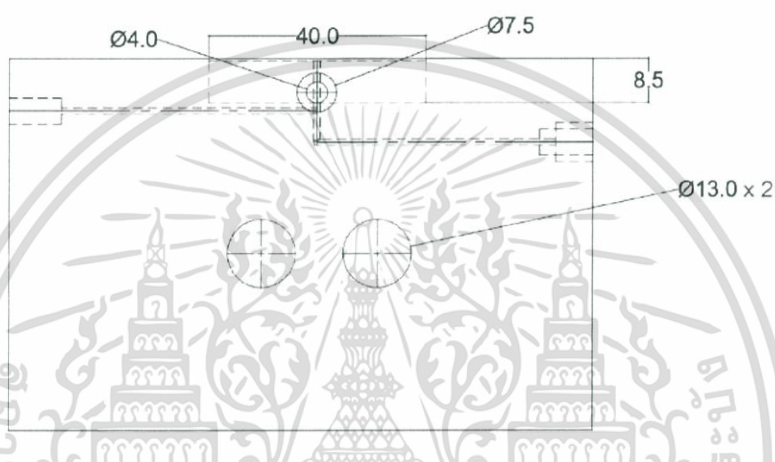


รูปที่ 3.8 ภาพฉายด้านบนของฉนวนเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

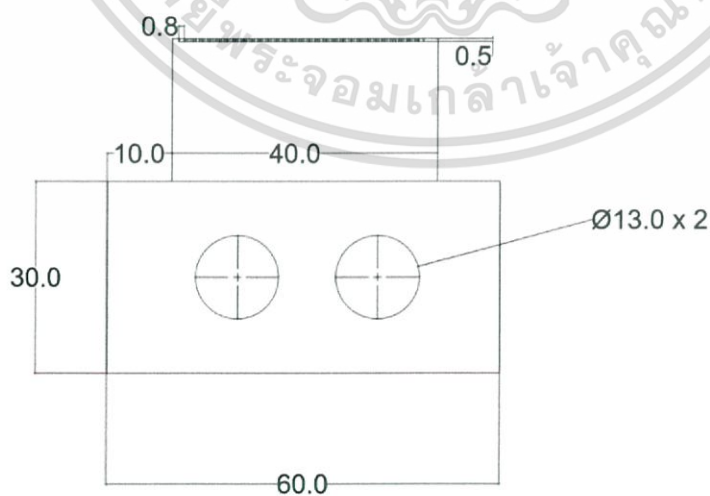


รูปที่ 3.9 ภาพฉายด้านข้างของฉนวนเรซิน



รูปที่ 3.10 ภาพฉายด้านหน้าของฉนวนเรซิน

3.1.3.2 ไมโครเซนแนลฮีตซิงค์ทองแดง



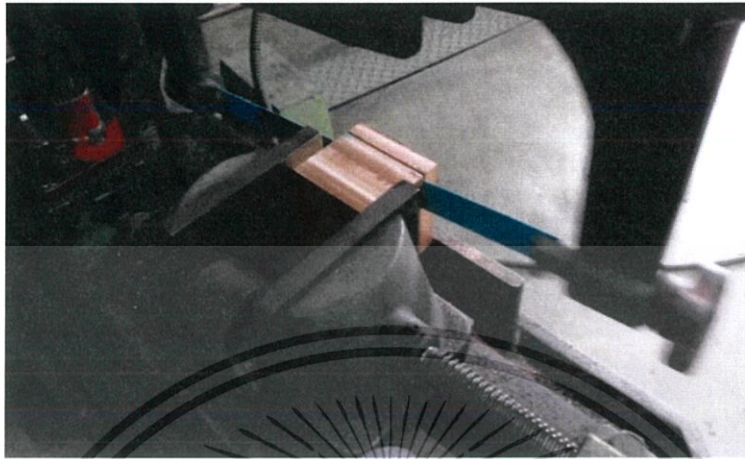
รูปที่ 3.11 ภาพฉายด้านหน้าของฮีตซิงค์ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทำชุดทดลองและฉนวนเรซิน

3.2.1 การทำชุดทดลอง

ทำการตัดชิ้นงานก้อนทองแดงให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการและปาดผิวชิ้นงานให้เรียบ

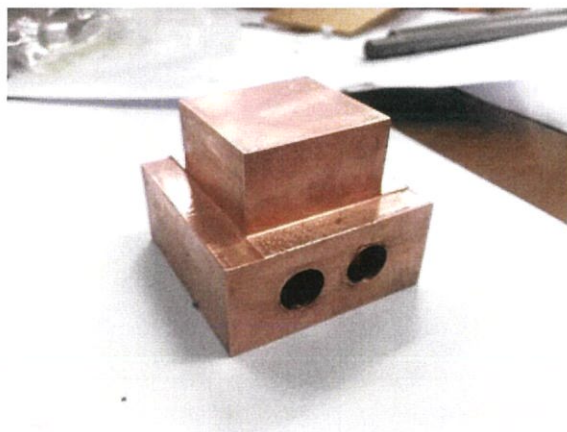


รูปที่ 3.12 การตัดชิ้นงานทองแดง



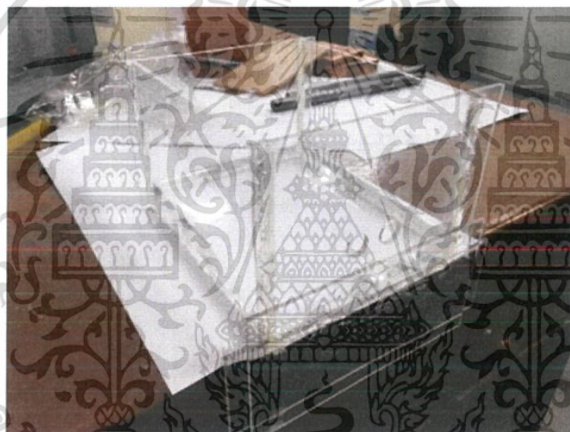
รูปที่ 3.13 การปาดผิวชิ้นงานทองแดง

หลังจากนั้น ทำการเจาะรูสำหรับใส่ฮีตเตอร์แท่ง จำนวน 2 รู



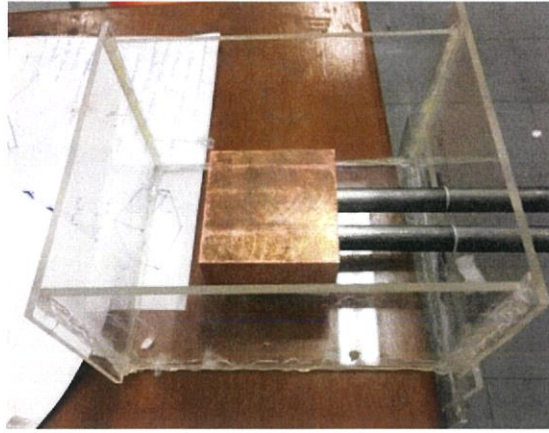
รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทองแดงที่ทำการเจาะรูฮีตเตอร์และทำความสะอาดผิวแล้ว

ทำการสร้างแบบหล่อ (Mold) จากโครงสร้างที่ประกอบด้วยแผ่นอะคลิลิกสำหรับหล่อฉนวนอีพอกซีเรซินขึ้นหุ้มก้อนทองแดง และทำการฉีดยีซิลิโคนเพื่อป้องกันการติดกันของเรซินกับแบบหล่อ



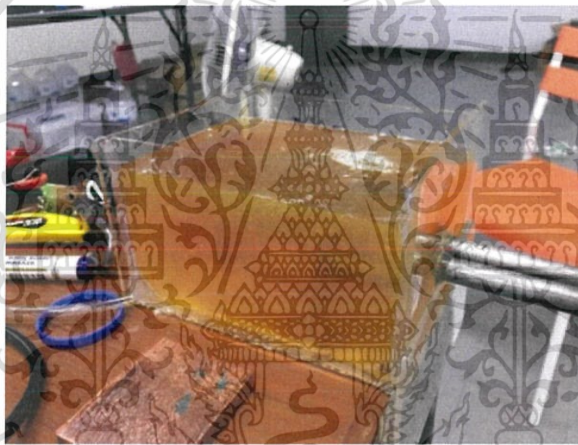
รูปที่ 3.15 แบบหล่อชุดทดลอง

วางชิ้นงานก้อนทองแดงคว่ำลงในแบบหล่อ ใส่แท่งเหล็กในรูฮีตเตอร์เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของชุดทดลองและการซึมผ่านของเนื้อเรซินระหว่างการหล่อ และมีการทาน้ำมันทั่วแท่งเหล็กเพื่อให้ง่ายต่อการถอดแท่งเหล็กออก

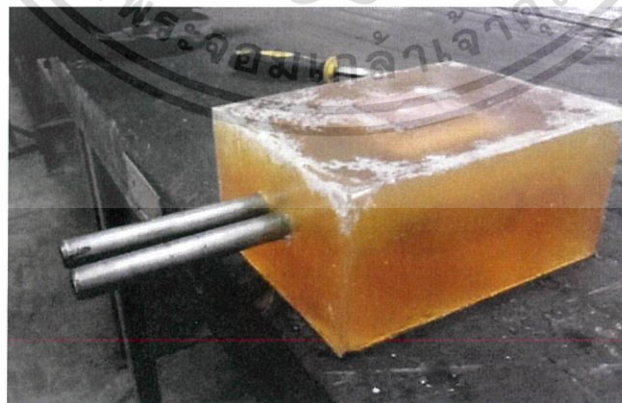


รูปที่ 3.16 ก้อนทองแดงวางลงในแบบหล่อ

ผสมและเทอีพอกซีเรซินลงในแบบและทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการแกะแบบหล่อและดึงแท่งเหล็กออกจากชิ้นงาน



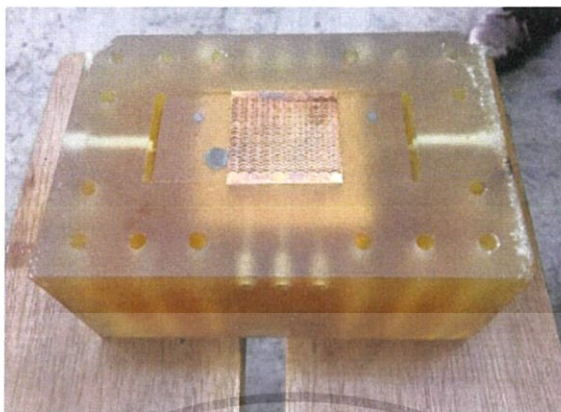
รูปที่ 3.17 อีพอกซีเรซินแข็งตัวหลังจาก 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.18 ชิ้นงานที่แกะจากแบบหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการกัดร่องทางเข้า-ออกน้ำ ท่อไมโครแชนแนลคลื่น โดยใช้เครื่อง CNC เจาะรูเพื่อใส่อุปกรณ์ วัดความดันและอุณหภูมิ เจาะรูทางเข้า-ออกของน้ำ และรูสำหรับน็อตยึดติดชุดทดลองกับฐาน



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์

ข้อมูล	ไมโครแชนแนลรูปคลื่น	ไมโครแชนแนลรูปตรง
ความกว้างช่อง(mm)	0.8	0.8
ความลึกช่อง(mm)	0.5	0.5
วัสดุ	ทองแดง	ทองแดง
ความกว้างของครีป(mm)	0.5	0.5
จำนวนช่องทั้งหมด	26	30
รูปทรง	โค้ง	ตรง

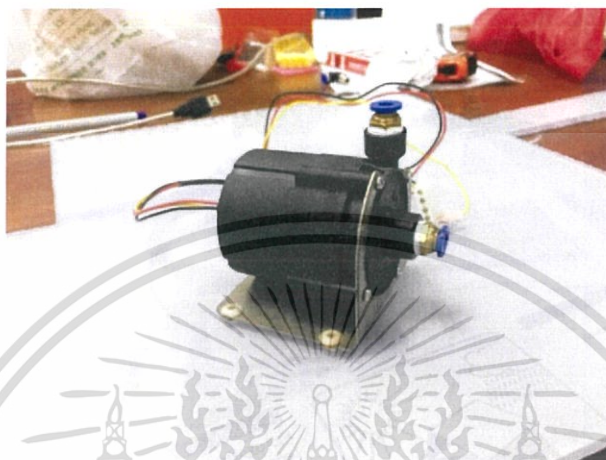
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของช่องไมโครแชนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองมี ดังนี้

1. ปั๊มน้ำแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) ขนาด 18 W และเฮดปั๊ม 5 m ใช้สำหรับดูดจ่ายน้ำจากถังเก็บน้ำไปยังชุดทดลอง โดยอาศัยแรงเหวี่ยงจากใบพัดที่อยู่ภายในตัวปั๊มดูดจ่ายน้ำจากจุดเริ่มต้นไปยังชุดทดลอง



รูปที่ 3.20 ปั๊มน้ำแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

2. ปั๊มลมหรือเครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ใช้ส่งผ่านลมจากตัวปั๊มเข้าสู่ชุดทดลอง โดยส่วนประกอบของปั๊มลมมี 2 ส่วน คือ ตัวปั๊มลม (Air compressor) และ ถังเก็บลม (Air tank) โดยตัวปั๊มลมจะทำหน้าที่ป้อนลมเข้าไปเก็บไว้ในถังเก็บลมเป็นช่วงสั้นๆ และถังเก็บลมทำหน้าที่ในการจ่ายลมออก



รูปที่ 3.21 เครื่องอัดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์ผสม (Mixing chamber) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการผสมน้ำและอากาศก่อนที่จะเข้าสู่ชุดทดลอง โดยอุปกรณ์ผสมที่ใช้จะเป็นแบบตัวที (T-shaped mixer)



รูปที่ 3.22 อุปกรณ์ผสมรูปตัวที

4. โรตاميเตอร์ (Rotameter) ใช้ในการปรับอัตราการไหลของน้ำและอากาศก่อนเข้าสู่ชุดทดลอง โดยความละเอียดของโรตاميเตอร์จะอยู่ในช่วงที่ต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน



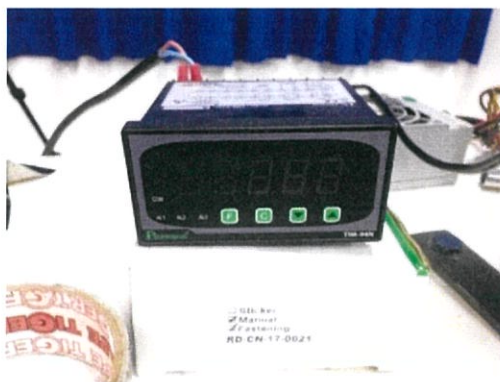
รูปที่ 3.23 โรตاميเตอร์

5. ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer) ใช้สำหรับวัดความดันขาเข้าของน้ำก่อนที่จะเข้าสู่ไมโครเซนแนล โดยอุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่ในการแปลงค่าความดันเป็นสัญญาณไฟฟ้าและแสดงผลเป็นตัวเลขผ่านหน้าจอแสดงผลแบบดิจิตอล



รูปที่ 3.24 ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 หน้าจอแสดงผลดิจิทัล

6. เครื่องบันทึกผลข้อมูล (Data logger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงสัญญาณอนาล็อกจากเครื่องมือวัดต่างๆ ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและเก็บบันทึกค่าที่ได้

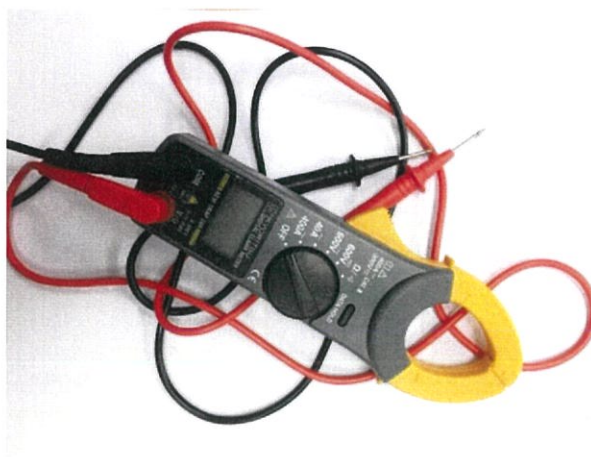


รูปที่ 3.26 เครื่องบันทึกผลข้อมูล

7. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยในการทดลองนี้จะใช้ เทอร์โมคัปเปิลชนิด T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 mm ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิแต่ละจุดในชุดทดลอง โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากโลหะตัวนำที่ต่างกัน 2 ชนิด โดยเทอร์โมคัปเปิลจะมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับช่วงการวัดอุณหภูมิในแต่ละการใช้งาน

8. มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital multimeter) ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฮีตเตอร์ รวมไปถึงกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล

9. ฮีตเตอร์แบบแท่ง (Cartridge heater) ขนาดตัวละ 150 W สองตัว ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของระบบ โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.28 ฮีตเตอร์แบบแท่ง

10. ท่อยาวหรือท่อพียู (Polyurethane tubing) เป็นท่อที่มีความยืดหยุ่นและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ค่าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง โดยทดลองที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปรับจากโรตاميเตอร์ ที่อัตราการไหลของน้ำ 7 ค่า และอัตราการไหลของอากาศ 5 ค่า แสดงเป็นตัวเลขเรย์โนลด์

ตารางที่ 3.2 ค่าที่ใช้ในการทดลองในท่อตรงและท่อคลื่นขณะทำการทดลองของไหลสถานะเดียว

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
\dot{Q}_{heater}	20 Watts
Water flowrate (CCM)	100, 150, 200, 250, 300, 350, 400
Re_{SL}	105, 150, 200, 245, 290, 340, 370

ตารางที่ 3.3 ค่าที่ใช้ในการทดลองในท่อตรงและท่อคลื่นขณะทำการทดลองของไหลสองสถานะ

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
\dot{Q}_{heater}	20 Watts
Water flowrate (CCM)	100, 150, 200, 250, 300, 350, 400
Air flowrate (LPM)	0.5, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50
Re_{SL} (straight)	108, 153, 198, 243, 289, 337, 384
Re_{SG} (straight)	28, 42, 56, 70, 84
Re_{SL} (wavy)	126, 178, 229, 279, 327, 379, 427
Re_{SG} (wavy)	32, 49, 65, 81, 97

3.5 ขั้นตอนในการทดลอง

1. เติมน้ำใส่ถังเก็บน้ำสำหรับการป้อนน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง
2. เปิดปั้มน้ำ ปั้ลม ฮีตเตอร์ อุปกรณ์วัดความดัน และ data logger
3. ทำการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำ อากาศ และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ ให้ได้ตามที่ต้องการ
4. เชื่อมต่อเครื่องบันทึกผลข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ และเปิดโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงและเก็บผล
5. ดูแนวโน้มของอุณหภูมิที่แสดงผลในโปรแกรม
6. ทำการบันทึกผลเป็นเวลา 15 นาที จนอุณหภูมิมาค่าคงที่ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าที่ได้มาเฉลี่ย
7. ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ได้จากตำแหน่งต่างๆและความดันทางเข้า-ออกของชุดทดลอง และนำมาคำนวณผลในซอฟต์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสถานะเดียว (น้ำ) และสองสถานะ (อากาศ-น้ำ) ในท่อคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาดเล็กวางตัวในแนวนอน ทำการทดลองที่อัตราไหลของน้ำ 7 ค่า ที่ 100, 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 g/min ประมาณเป็นตัวเลขเรย์โนลด์ และมีการเติมอากาศสำหรับการไหลสองสถานะ อัตราการไหลของอากาศ 5 ค่า ที่ 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 LPM ประมาณเป็นค่าตัวเลขเรย์โนลด์ โดยให้พลังความร้อนที่พื้นผิววงที่ตามแนวแกน 20 W และทำการเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนและความดันตกภายในท่อเปรียบเทียบระหว่างการไหลสองสถานะกับการไหลสถานะเดียว ระหว่างท่อไมโครเซนแนลแบบตรงและไมโครเซนแนลแบบคลื่น

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง ทำเพื่อทดสอบความถูกต้องของชุดทดลองว่า มีค่าคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีหรือจากการทดลองที่ศึกษามาก่อนหน้ามากน้อยเพียงใด ซึ่งในการศึกษานี้จะแบ่งการตรวจสอบความถูกต้องของผลทดลองออกเป็นสองส่วน คือ การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสถานะเดียว และการตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะ ดังหัวข้อต่อไปนี้

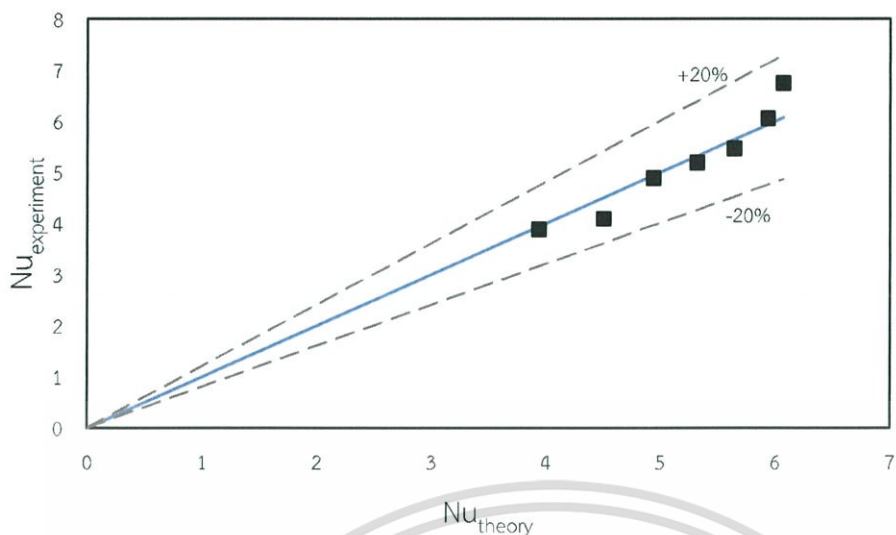
4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลในท่อตรง

4.1.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสถานะเดียว

การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสถานะเดียวสามารถใช้สมการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์จากสหสัมพันธ์ของ Sieder-Tate ดังสมการที่ (4.1)

$$Nu = 1.86(Re Pr D / L)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.1)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนกับสหสัมพันธ์ของ Sieder-Tate ดังรูปที่ 4.1 พบว่าการไหลแบบสถานะเดียวมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 11.73% เนื่องจากค่าของผล Re ในการทดลองจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็ว ซึ่งในเซตอุปกรณ์การทดลองตัวปรับความเร็วของน้ำมีอายุในการใช้งานที่มากจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความเร็วอยู่ที่บวกลบ 5 CCM จึงทำให้ผลออกมาได้ไม่ตีมากนักรวมถึงค่าของตัว Pr ที่อาจจะทำการทดลองคนละวัสดุจากต้นแบบจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้จากผลการทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสเซลท์สำหรับการไหลแบบสถานะเดียวที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของ Sieder-Tate

4.1.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะ

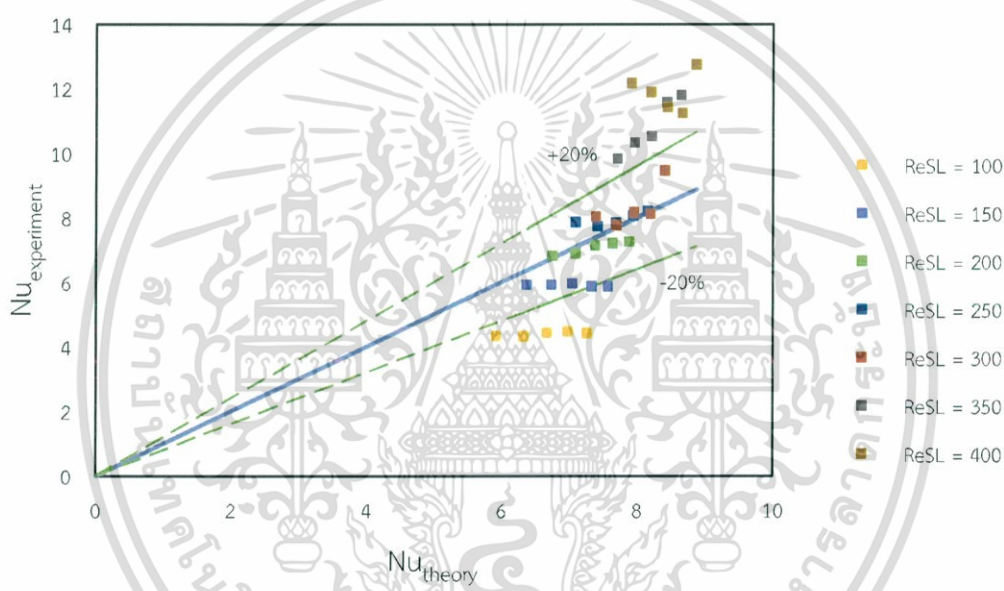
การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสองสถานะสามารถใช้สมการทำนายค่าตัวเลขสเซลท์ที่ถูกพัฒนาโดย Chuanshuai Dong & Takashi Hibiki ดังสมการที่ (4.2) และ(4.3)

$$Nu_{1\phi} = 1.86(Re_f Pr_f D/L)^{1/3} \left(\frac{\mu_B}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4.2)$$

$$\frac{Nu_{2\phi}}{Nu_{1\phi}} = (1 - \alpha)^{0.257} (1 + 4.27 X^{-0.697}) \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนที่ถูกพัฒนาโดย Chuanshuai Dong & Takashi Hibiki ดังรูปที่ 4.2 พบว่าการไหลแบบสองสถานะ อากาศ-น้ำ มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 19.332% เนื่องด้วยการทดลองเป็นแบบสองสถานะก่อนทางเข้าชิ้นงานจึงต้องมีตัวเชื่อมระหว่างน้ำกับอากาศหรือ Y-Joint ซึ่งบริเวณนี้จะเกิดผลต่างความดันเกิดขึ้นจึงส่งผลให้ตัวปรับความเร็วของทั้งน้ำและอากาศไม่คงที่ส่งผลให้ค่าของความเร็วมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นกับทั้งน้ำและอากาศรวมไปถึงความหนาแน่นของตัวน้ำเองที่อาจจะมีอากาศจำนวนเล็กๆที่เข้าไปผสมจากรอบการทดลองก่อนหน้าทำให้ความหนาแน่นเกิดค่าที่ผิดไปจากเดิมเล็กน้อยซึ่งทั้งหมดจะส่งผลต่อค่า Re ในสมการหาค่า $Nu_{2\phi}$ รวมไปถึงสมการของ Lockhart-Martinelli dimensionless หรือค่า X ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำและอากาศรวมไปถึงค่าความหนาแน่นโดยตรงจึงส่งผลให้ค่าของ $Nu_{2\phi}$ มีผลที่คลาดเคลื่อนออกไปจากเดิมเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนี้สเซลล์สำหรับการไหลแบบสองสถานะ อากาศ-น้ำ ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายที่ถูกพัฒนาโดย Chuanshuai Dong & Takashi Hibiki

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

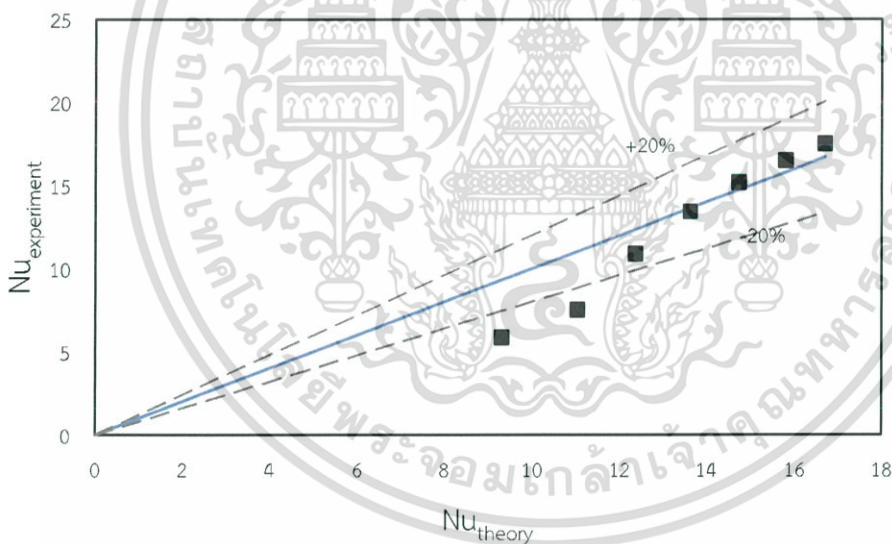
4.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลในท่อคลื่น

4.1.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสถานะเดียว

การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลสถานะเดียวสามารถใช้สมการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์จากสหสัมพันธ์ของ Dravid et al. ดังสมการที่ (4.4)

$$Nu = [0.65\sqrt{De} + 0.76] Pr^{0.175} \quad (4.4)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนกับสหสัมพันธ์ของ Dravid et al. ดังรูปที่ 4.3 พบว่าการไหลแบบสถานะเดียวมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 20.38% เนื่องจากชิ้นงานที่ทำทดลองมีบางช่องที่มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมส่งผลให้ค่า De ที่คำนวณออกมาไม่ถูกต้องทั้งหมดและลักษณะของท่อพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเมื่อน้ำไหลผ่านอาจจะไม่ตรงตามกรณีการทำนาย Nu ตามสมการของ Dravid et al. อีกหนึ่งเหตุผลคือตัวปรับความเร็วของน้ำที่มีอายุการใช้งานที่มากจึงทำให้ความเร็วคงที่เป็นเรื่องที่ยากทำให้ Re มีผลคลาดเคลื่อนพอสมควรจึงทำให้ผลการทดลองมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้น และ Pr ที่อาจจะทำการทดลองคนละวัสดุจากต้นแบบจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้จากผลการทดลอง



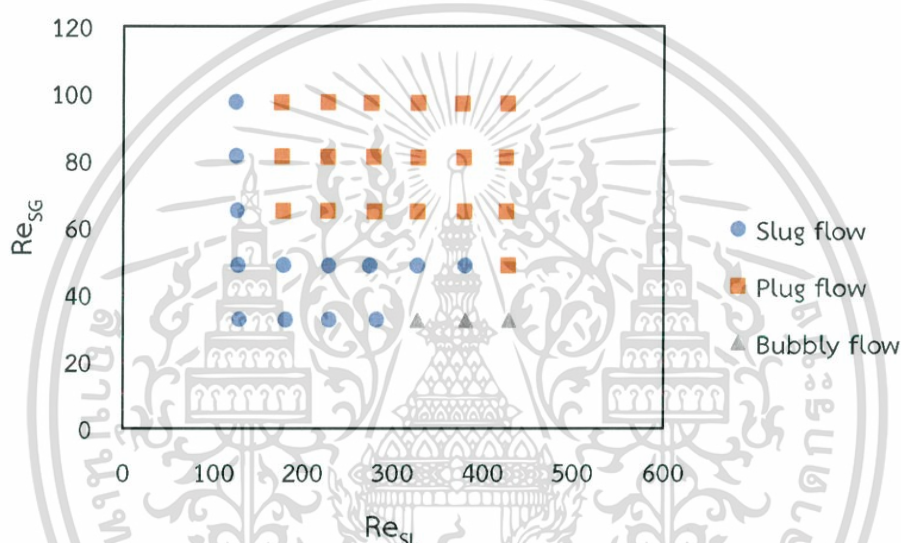
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์สำหรับการไหลแบบสถานะเดียวที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยสหสัมพันธ์ของ Dravid et al.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

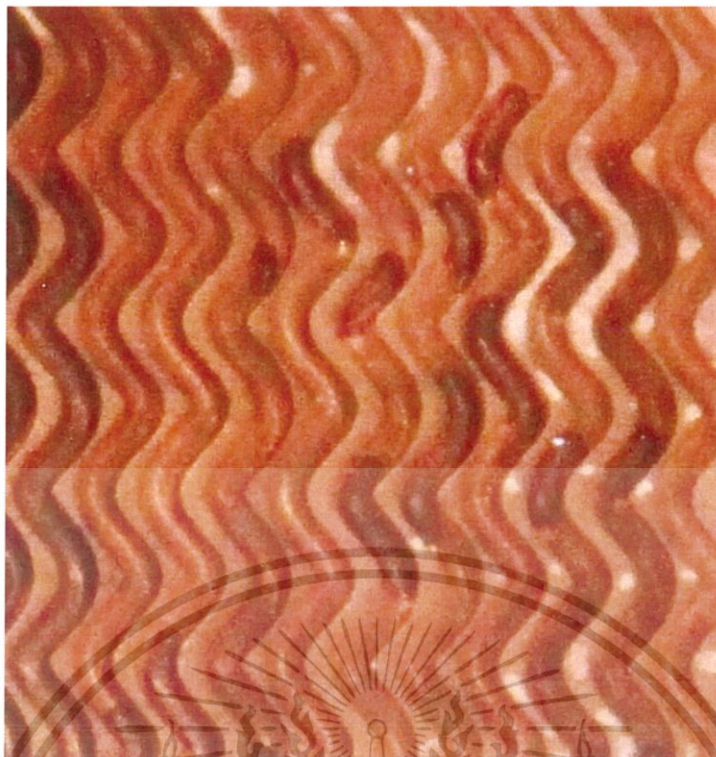
4.2 รูปแบบของการไหล

4.2.1 รูปแบบการไหลในท่อคลื่น

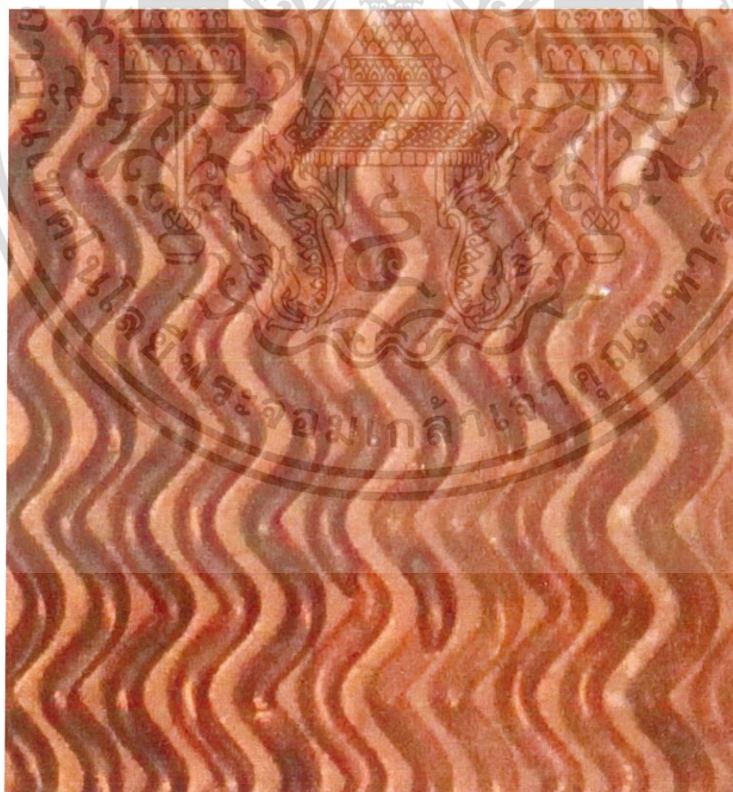
จากการทดลองพบว่า มีรูปแบบการไหลเกิดขึ้นในไมโครแชนแนลรูปคลื่น ทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ การไหลแบบ slug flow การไหลแบบ plug flow และ การไหลแบบ bubbly flow ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.5-4.7 พบว่ามักจะเกิดการไหลแบบ slug flow ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของของเหลว (Re_{SL}) เท่ากับ 126 ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของก๊าซ (Re_{SG}) เท่ากับ 32 – 97 และ ที่ค่า Re_{SL} เท่ากับ 178 - 379 ที่ค่า Re_{SG} เท่ากับ 32 – 49 จะเกิดการไหลแบบ plug flow ที่ Re_{SL} เท่ากับ 178 - 427 ที่ Re_{SG} เท่ากับ 65 – 97 ตามลำดับ และอาจจะเกิดการไหลแบบ bubbly flow เล็กน้อยที่ Re_{SL} เท่ากับ 327 - 427 ที่ Re_{SG} เท่ากับ 32



รูปที่ 4.4 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของการไหลแบบสองสถานะ น้ำ-อากาศ ในท่อรูปคลื่น



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการไหลแบบ slug flow



รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการไหลแบบ plug flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการไหลแบบ bubbly flow

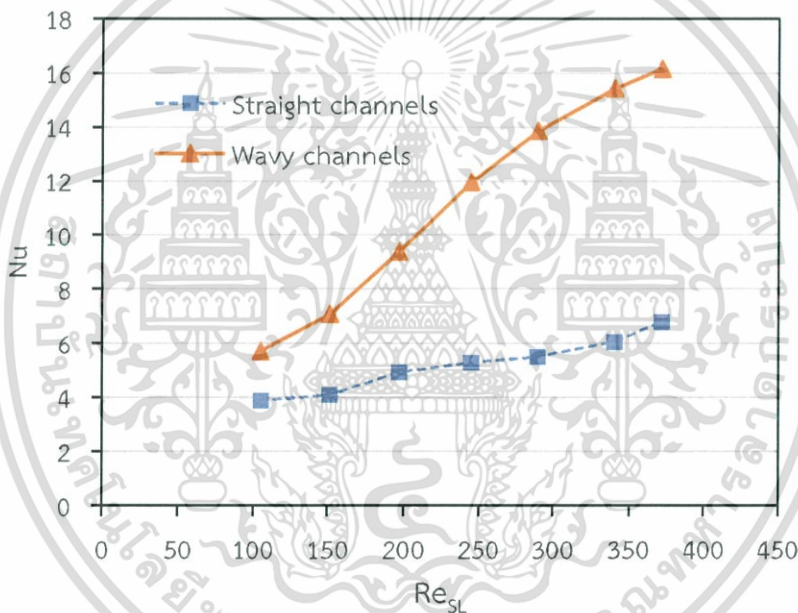


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การถ่ายเทความร้อน

4.3.1 การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสถานะเดียว

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลอง เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนเป็นค่าของตัวเลขนัสเซลท์ของการไหลสถานะเดียวในท่อไมโครเซนแนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมตรงและคลื่น ซึ่งได้มีการอธิบายวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อที่ 2.4 โดยใช้สมการที่ 2.13-2.19 และวิธีการคำนวณที่แนะนำให้โดย Lee (2010) เนื่องจากจำนวนช่องการไหลของไมโครเซนแนลคลื่นมีจำนวน 26 ช่อง ซึ่งน้อยกว่าช่องทางการไหลแบบตรงที่มี 30 ช่อง ทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์์ของของไหลที่เกิดขึ้นต่อ 1 ช่องทางการไหล ณ อัตราการไหลที่เท่ากันมีค่าที่ต่างกัน ทำให้การกำหนดอัตราการไหลเท่ากันไม่สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบได้ จึงต้องนำตัวเลขเรย์โนลด์์ที่เกิดขึ้นจากอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากการทดลองภายในไมโครเซนแนลแบบตรงมากำหนดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองกับไมโครเซนแนลแบบคลื่น พบว่า ตัวเลขเรย์โนลด์์มีค่าใกล้เคียงกัน ผลของอุณหภูมิมีส่วนเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์์ของของไหลน้อยมาก สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ทุกกรณี



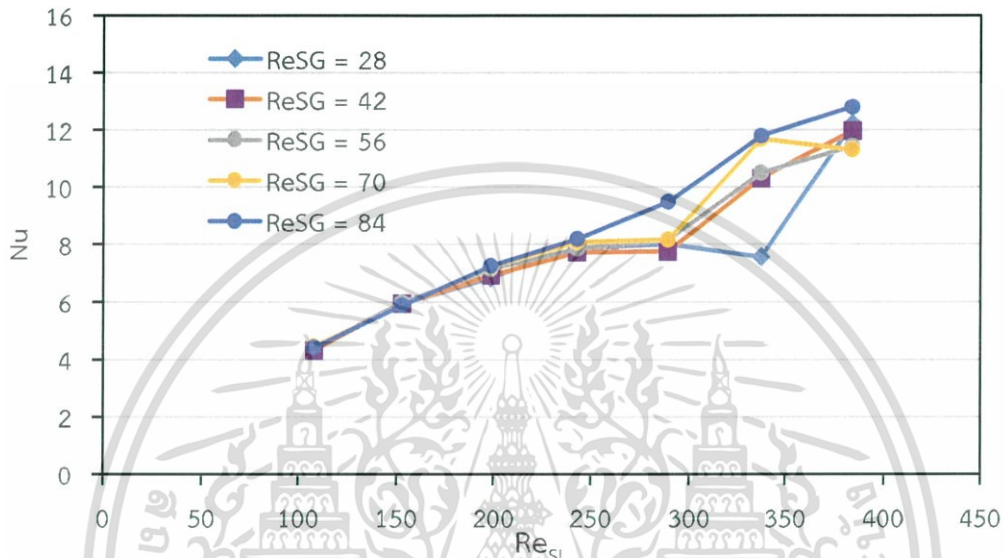
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสถานะเดียวระหว่างไมโครเซนแนลแบบตรงและแบบคลื่น

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ค่าตัวเลขนัสเซลท์มีแนวโน้มแปรผันตรงกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้นทั้งสองช่องทางการไหล สอดคล้องกับทฤษฎีของการพาความร้อนแบบบังคับ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวเลขนัสเซลท์ของไมโครเซนแนลคลื่นและไมโครเซนแนลตรง พบว่าค่าตัวเลขนัสเซลท์ของไมโครเซนแนลคลื่น มีค่าสูงกว่าค่าตัวเลขนัสเซลท์ของไมโครเซนแนลตรง เนื่องจากรูปทรงของการจัดเรียงตัวช่องทางการไหลแบบคลื่นทำให้เกิดการไหลวนและการปั่นป่วนของการไหล เกิดการผสมกันของของไหลและการרבววนชั้นขอบเขตของของไหลมากกว่าช่องทางการไหลแบบตรง ที่การผสมกันของของไหลไม่เกิดขึ้นและชั้นขอบเขตการไหลไม่ถูกรบกวนเท่าที่ควร

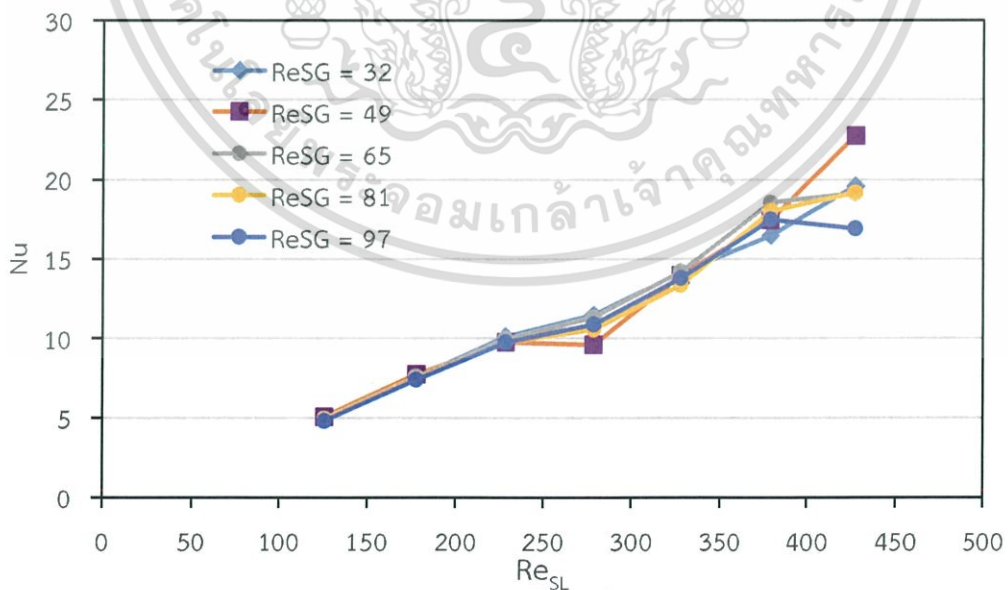
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลอง เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนเป็นค่าของตัวเลขนัสเซิลท์ของการไหลสองสถานะในท่อไมโครแชนแนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมตรงและคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยโดยใช้สมการเดียวกันกับการไหลแบบสถานะเดียว คือ สมการที่ 2.13-2.19 โดยจะใช้ค่า k ของของเหลวคือน้ำ แทนค่า k ของของไหลสองสถานะเนื่องจากยังไม่มีสมการความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่า k ของของไหลสองสถานะ

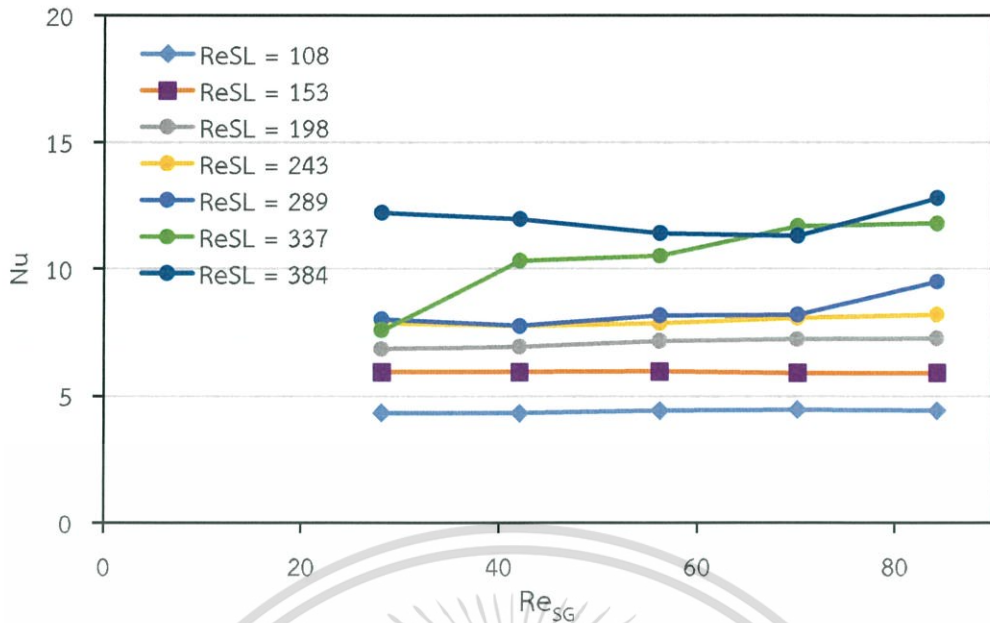


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแชนแนลแบบตรงต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำ

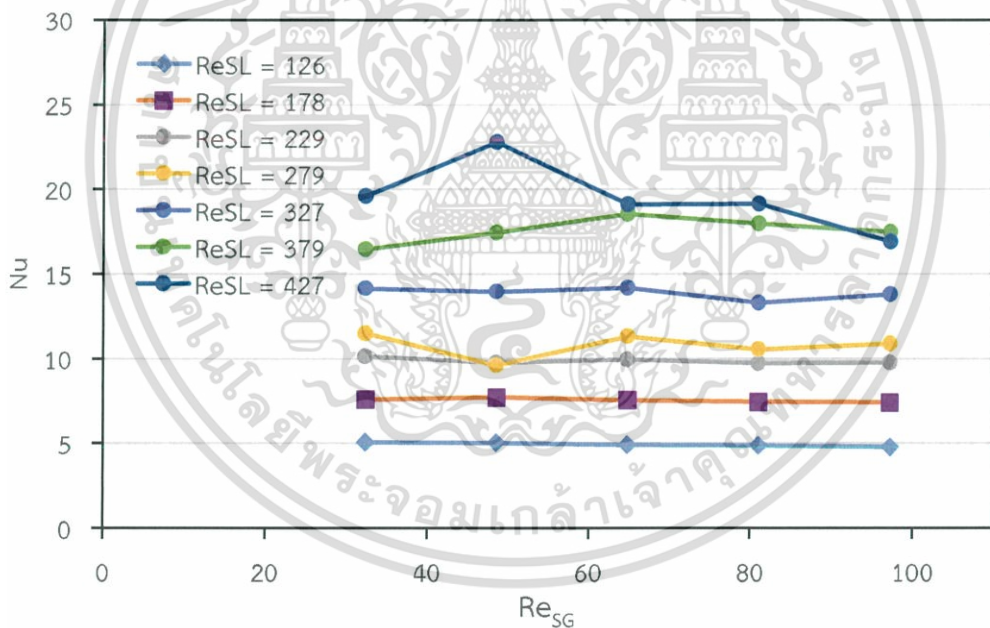


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแชนแนลแบบคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโคร
 แชนแนลแบบตรงต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศ

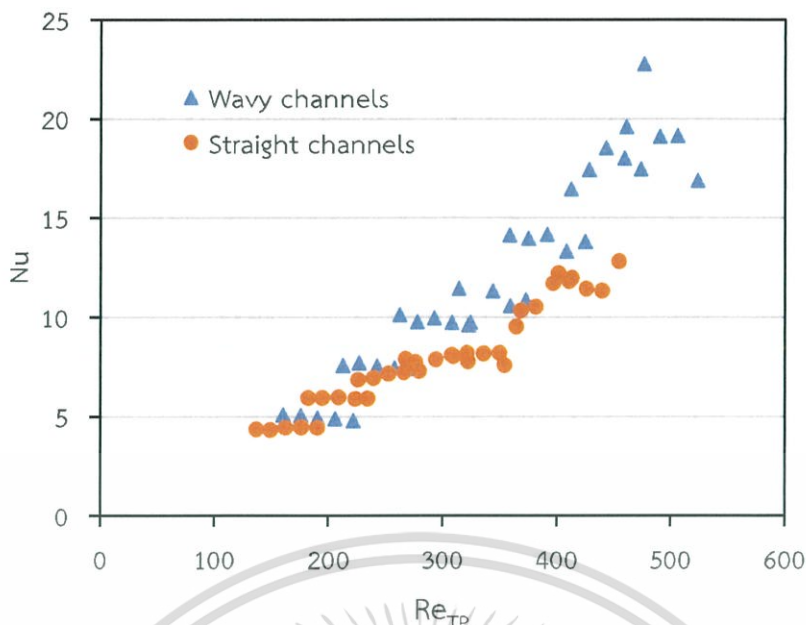


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายใน
 ไมโครแชนแนลแบบคลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศ

จากกราฟแสดงผลการทดลองรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนใน
 รูปของตัวเลขนิตเซลล์สำหรับการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแชนแนลแบบตรงและ
 แบบคลื่น ตามลำดับ โดยแสดงเปรียบเทียบในกรณีตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำเท่ากัน และแบ่งเส้นแนวโน้ม
 ตามตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศ พบว่า สำหรับทั้งแบบตรงและแบบคลื่น การถ่ายเทความร้อนมีค่าที่
 เพิ่มขึ้นแปรผันตามตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำ การเปลี่ยนแปลงของตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศ มีแนวโน้มให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสำหรับช่องทางการไหลแบบตรง แต่จะมีแนวโน้มที่ลดลงสำหรับช่องทางการไหลแบบคลื่น ซึ่งจะอธิบายต่อไป และพบว่าช่องทางการไหลแบบคลื่นจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าช่องทางการไหลแบบตรงเป็นจำนวนเท่าในทุกกรณี และจากกราฟแสดงผลการทดลองรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวเลขนิต์เชิลท์สำหรับการไหลแบบสองสถานะ(น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแชนแนลแบบตรงและแบบคลื่น ตามลำดับ โดยแสดงเปรียบเทียบในกรณีที่ตัวเลขเรย์โนลด์ของของอากาศเท่ากัน และแบ่งเส้นแนวโน้มตามตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำ พบว่าในช่องทางการไหลแบบตรง แนวโน้มของการถ่ายเทความร้อนแปรผันตามตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศ ในกรณีที่ Re_{SL} เท่ากับ 198, 243, 289, 337 และ 384 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา และจะมีแนวโน้มที่คงที่ในกรณีที่ Re_{SL} เท่ากับ 108 และ 153 แต่สำหรับช่องทางการไหลแบบคลื่นนั้น แนวโน้มการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบคงที่ในกรณีที่ Re_{SL} เท่ากับ 126, 178, 229, 279 และ 327 และมีแนวโน้มที่จะถ่ายเทความร้อนได้ลดลงในกรณีที่ Re_{SL} เท่ากับ 379 และ 427 แต่ในทุกกรณี ค่าการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในช่องทางการไหลแบบคลื่นมีค่ามากกว่าช่องทางการไหลแบบตรงเป็นจำนวนเท่าเช่นเดียวกับการไหลแบบสถานะเดียว เนื่องจากลักษณะการไหลของไมโครแชนแนลคลื่น ทำให้เกิดการผสมกันของของไหลได้ดีมากกว่าไมโครแชนแนลแบบตรง รวมถึงผลของการผสมกันของน้ำและอากาศ ที่มีอากาศเป็นส่วนช่วยให้ของไหลผสมกันได้ดียิ่งขึ้น สร้างความปั่นป่วนและการรบกวนของชั้นของเขตการไหล การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจึงเป็นส่วนช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนในไมโครแชนแนลแบบตรงได้ แต่สำหรับกรณีของไมโครแชนแนลแบบคลื่น ผลการทดลองแสดงถึงกรณีที่ค่าการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มคงที่หรือลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่มากเกินไปส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นกับชนิดตัวกลางคือ น้ำ เป็นหลัก และความจุความร้อนของน้ำมีค่ามากกว่าความจุความร้อนของอากาศ อากาศจึงเป็นแค่ส่วนช่วยในการผสมกันของการไหลแบบสองสถานะเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามค่าการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในไมโครแชนแนลแบบคลื่น ยังสูงกว่าไมโครแชนแนลแบบตรงอยู่ ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ไมโครแชนแนลแบบคลื่นสามารถใช้อัตราการไหลของอากาศที่น้อยกว่าไมโครแชนแนลแบบตรง แต่ยังได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า ในกรณีที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่



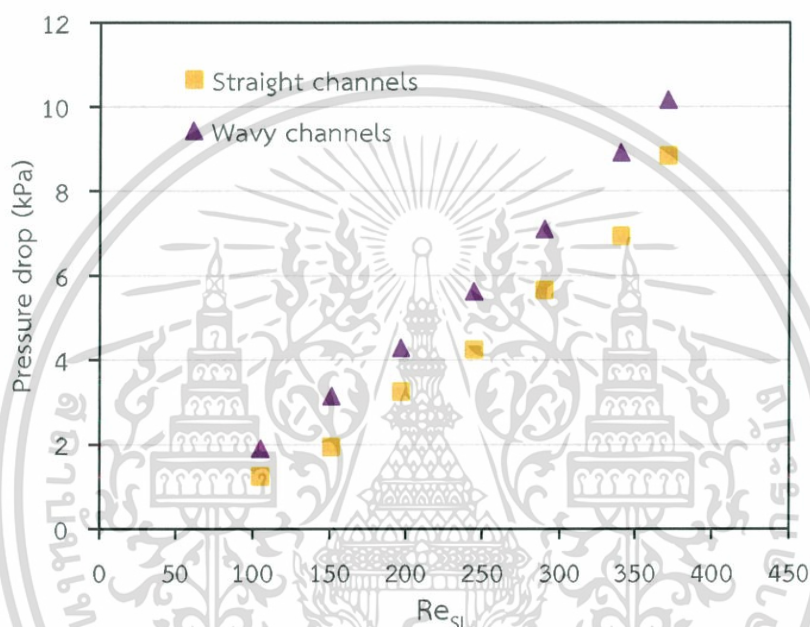
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในไมโครแชนแนลแบบตรงและแบบคลื่น โดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์แบบสองสถานะ

จากรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างไมโครแชนแนลแบบตรงและแบบคลื่น กับการเปลี่ยนแปลงตัวเลขเรย์โนลด์แบบสองสถานะ พบว่า ในกรณีไมโครแชนแนลแบบตรง แนวโน้มของค่าตัวเลขนิตเชิลท์แปรผันตามตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะตลอดช่วงของการทดลอง แต่สำหรับไมโครแชนแนลแบบคลื่น ค่าตัวเลขนิตเชิลท์แปรผันตามตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะ ในช่วง Re_{TP} ต่ำกว่า 450 แต่ในช่วงที่ Re_{TP} สูงกว่า 450 พบว่า ค่าตัวเลขนิตเชิลท์มีแนวโน้มที่จะคงที่ สอดคล้องกับข้อสรุปที่กล่าวข้างต้นว่า ปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป ส่งผลต่อการลดลงของค่าตัวเลขนิตเชิลท์ในไมโครแชนแนลแบบคลื่นมากกว่าไมโครแชนแนลแบบตรง แต่เนื่องจำนวนช่องการไหลของไมโครแชนแนลแบบคลื่นมีจำนวน 26 ช่อง ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าช่องการไหลของไมโครแชนแนลแบบตรงที่มี 30 ช่อง ทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่เกิดขึ้นจริงภายในช่องการไหล 1 ช่อง มีค่าไม่สัมพันธ์กับเงื่อนไขการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลทั้งสอง และการคำนวณอัตราการไหลที่สัมพันธ์กับตัวเลขเรย์โนลด์ภายในช่องการไหล โดยเฉพาะอัตราการไหลของอากาศมีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง เป็นการยากที่จะสามารถปรับอัตราการไหลของของไหลทั้งสองสถานะพร้อมกันให้สัมพันธ์กับตัวเลขเรย์โนลด์ที่ต้องการได้เช่นเดียวกับการไหลแบบสถานะเดียว จึงต้องทำการทดลองโดยใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลทั้งสองสถานะที่ค่าเดียวกันกับทั้งสองรูปแบบช่องทางการไหล และจากรูปที่ 4.5 แสดงถึงช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะที่ปรากฏผลการทดลองของทั้งสองรูปแบบช่องการไหลที่ Re_{TP} ตั้งแต่ 150 ถึง 450 ที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้

4.4 ความดันลด

4.4.1 ความดันลดของการไหลแบบสถานะเดียว

การนำไมโครแชนแนลซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมาใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติ นอกจากจะพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนที่ได้มาแล้ว ต้องพิจารณาถึงความดันลดที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากอัตราการไหลของน้ำกับอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความดันลดเพิ่มขึ้นด้วย กำลังงานที่ปั๊มน้ำและบีบลมที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกช่วงการใช้งานให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานดังต่อไปนี้

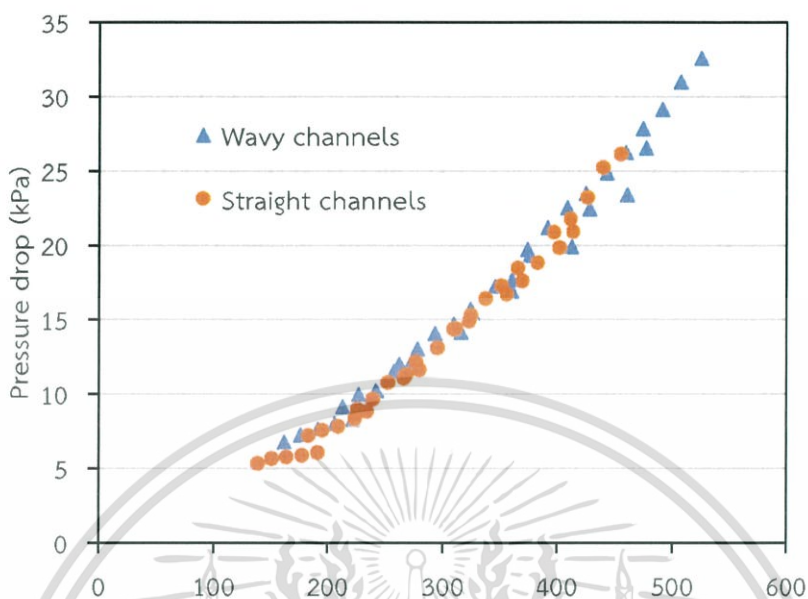


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความดันลดของการไหลแบบสถานะเดียว ภายในไมโครแชนแนลแบบตรงและแบบคลื่น

จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของความดันลดในกรณีการไหลแบบสถานะเดียว ระหว่างไมโครแชนแนลแบบตรงและแบบคลื่น พบว่า ความดันลดแปรผันตรงกับตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำ และความดันลดที่เกิดขึ้นในไมโครแชนแนลแบบคลื่นจะสูงกว่าความดันลดที่เกิดขึ้นในไมโครแชนแนลแบบตรงทุกกรณี เป็นผลมาจากรูปทรงที่ต่างกันของช่องทางการไหล ด้วยลักษณะของท่อคลื่นลูกคลื่นที่มีการขวางเส้นทางการไหลโดยผนังท่ออยู่ตลอดระยะทาง เส้นทางการไหลของของไหลไม่ได้เป็นเส้นตรง ซึ่งต่างจากท่อตรงที่เส้นทางการไหลที่ไม่มีผนังท่อขวางเส้นทางการไหล และเส้นทางการไหลของของไหลนั้นเป็นเส้นตรง จึงส่งผลให้เกิดผลการทดลองดังกล่าว

4.4.2 ความดันลดของการไหลแบบสองสถานะ

การทดลองหาค่าความดันลดของการไหลแบบสองสถานะ ทำในลักษณะเดียวกับการหาความดันลดของการไหลแบบสถานะเดียว แต่การนำเสนอข้อมูลผลการทดลองจะใช้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะ



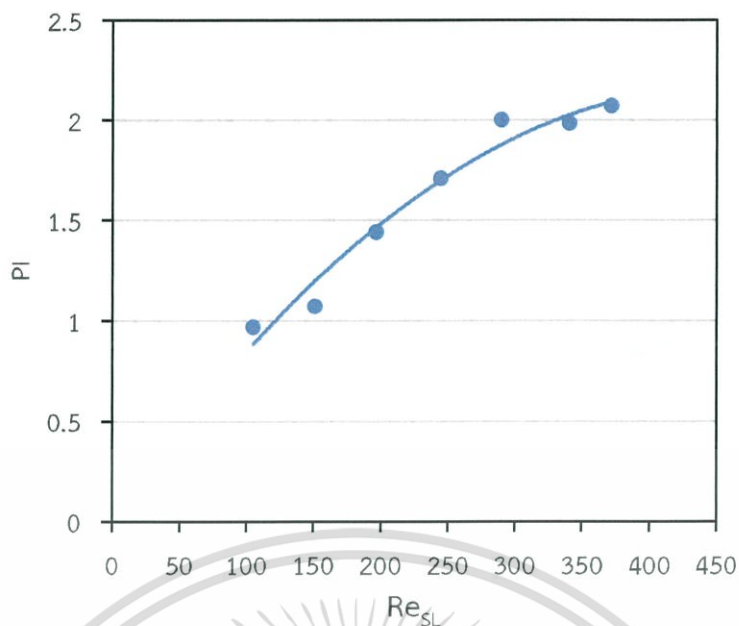
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความดันลดของการไหลแบบสองสถานะ ภายในไมโครแชนแนลแบบตรงและแบบคลื่น โดยใช้ตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะ

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลของความดันลดต่อตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะทั้งหมด 35 กรณี ในไมโครแชนแนลแบบตรงและแบบคลื่น พบว่า ในช่วง Re_{TP} 150 ถึง 450 ความดันลดยังคงแปรผันตรงกับตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะตามทฤษฎี และความดันลดในไมโครแชนแนลแบบคลื่นมีค่าสูงกว่าความดันลดในไมโครแชนแนลแบบตรงทุกกรณี โดยเหตุผลสามารถอธิบายได้แบบเดียวกันกับหัวข้อ 4.4.1

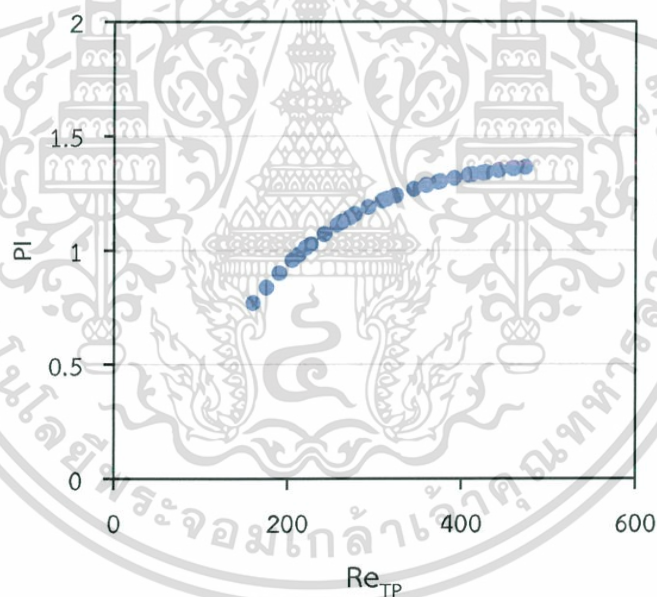
4.5 สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance Index, PI)

เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนภายในท่อไมโครแชนแนลแปรผันตรงกับความดันลด ดังนั้น สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง จำเป็นที่จะต้องเลือกช่วงการใช้งานที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน Hashemi et al. (2012) ได้เสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance Index, PI) ไว้ดังสมการที่ (2.27) ซึ่งสามารถอธิบายให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลของการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของค่าการถ่ายเทความร้อนเป็นตัวเลขนิต์เซิลท์ ต่อการเพิ่มขึ้นของความดันลดที่เป็นอัตราส่วนเช่นกัน โดยในการเปรียบเทียบสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะจะใช้ค่าเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะ เนื่องจากจำนวนข้อมูลมีมากถึง 35 กรณีที่ต่างกัน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ และค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะเป็นค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนของไมโครแชนแนลแบบคลื่น ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในไมโครแชนแนลแบบคลื่นของการไหลแบบสถานะเดียว และเส้นแนวโน้ม



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในไมโครแชนแนลแบบคลื่นของการไหลแบบสองสถานะ

จากรูปที่ 4.16 จะพบว่าค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสถานะเดียวในไมโครแชนแนลคลื่นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง แล้วลดลงตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น สามารถใช้สมการกำลังสองในการประมาณค่าออกมาเป็นเส้นแนวโน้มดังรูป ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ Re_{SL} เท่ากับ 370 และจากรูปที่ 4.17 เนื่องจากค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Re_{TP} ของไมโครแขนแนลตรงและคลื่นมีค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยแต่มีช่วงที่ใช้งานร่วมกันคือช่วง Re_{TP} 150 ถึง 450 จึงสามารถนำเส้นแนวโน้มของรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 มาใช้หาค่าค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนดังนั้นจะพบว่าค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเห็นได้ชัด จึงสามารถกล่าวได้ว่า ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนแปรผันตามตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะได้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดที่ Re_{TP} เท่ากับ 475 จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะสังเกตได้ว่า ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำกว่า 1 ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำในช่วงหนึ่ง แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง การศึกษารูปแบบการไหล และการถ่ายเทความร้อน สำหรับการไหลของของไหลสถานะเดียวและสองสถานะ (น้ำกับอากาศ) ภายในท่อสี่เหลี่ยมขนาดเล็กทั้งแบบตรงและแบบคด ซึ่งทำจากทองแดง มีอิพอกซีเรซินเป็นฉนวนหุ้ม ท่อไมโครแชนแนลทั้งแบบตรงและแบบคดมีขนาดพื้นที่หน้าตัดกว้าง 0.8 mm สูง 0.5 mm ยาว 40 mm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.62 mm มีความยาวรวมหรือพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เท่ากัน มีจำนวนทั้งหมด 30 ท่อ สำหรับไมโครแชนแนลแบบตรง และ 26 ท่อ สำหรับไมโครแชนแนลแบบคด ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือด โดยให้ฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวคงที่ ทำการทดลองที่ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของของเหลวอยู่ในช่วง 108 ถึง 427 และตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลของก๊าซอยู่ในช่วง 28 ถึง 97 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สำหรับการทดลองการไหลแบบสถานะเดียว ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากไมโครแชนแนลแบบคดมีค่ามากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากไมโครแชนแนลแบบตรงในทุกกรณี ถึงแม้ว่าค่าความดันตกภายในไมโครแชนแนลแบบคดจะมีค่ามากกว่าค่าความดันตกภายในไมโครแชนแนลแบบตรงก็ตาม ซึ่งทำให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนของไมโครแชนแนลแบบคดมีค่าต่ำกว่า 1 ช่วงที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของของเหลวต่ำๆ แต่ในภาพรวมค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงกว่า 1 เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ของของเหลวมีค่าสูงขึ้น แสดงถึงความได้เปรียบของไมโครแชนแนลแบบคดที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริงแทนไมโครแชนแนลแบบตรง

2. สำหรับการศึกษาดทดลองและการทำแผนที่การไหลแบบสองสถานะภายในไมโครแชนแนลแบบคด จะพบว่า เกิดรูปแบบการไหล 3 รูปแบบ คือ slug flow และ plug flow และ bubbly flow ซึ่งแตกต่างจากรูปแบบการไหลภายในไมโครแชนแนลแบบตรงที่ศึกษามา โดย slug flow จะเกิดที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของน้ำต่ำๆ แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศมีค่าสูงขึ้นจะสามารถสังเกตเห็น bubbly flow ได้ สำหรับ plug flow นั้นจะสามารถสังเกตเห็นได้ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของทั้งน้ำและอากาศที่ค่าสูงๆ

3. สำหรับการไหลแบบสองสถานะ ไมโครแชนแนลแบบคดให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าไมโครแชนแนลแบบตรงในทุกกรณี แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีของอากาศมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนของไมโครแชนแนลแบบคดมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องมาจากปริมาณอากาศมีมากเกินไปสำหรับไมโครแชนแนลแบบคด

4. ไมโครเซนแนลแบบคลื่นจะให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าไมโครเซนแนลแบบตรง ทั้งการไหลแบบสถานะเดียวและสองสถานะ โดยจุดที่ให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดจากการทดลอง คือ ที่ $Re_{sl} = 370$ สำหรับการไหลแบบสถานะเดียว และที่ $Re_{tp} = 450$ ที่การไหลแบบสองสถานะ การไหลแบบสถานะเดียวให้ค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการไหลแบบสองสถานะในกรณีของไมโครเซนแนลแบบคลื่น เป็นความได้เปรียบของไมโครเซนแนลแบบคลื่นที่ดีกว่าไมโครเซนแนลแบบตรงคือ สามารถใช้ไมโครเซนแนลแบบคลื่นที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าไมโครเซนแนลแบบตรงแทนได้โดยใช้ของไหลทำงานเพียงสถานะเดียว ลดการสิ้นเปลืองและความซับซ้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของอัตราส่วนด้านและลักษณะหน้าตัดท่อแบบอื่นๆ เช่น หน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู หน้าตัดครึ่งวงกลม เป็นต้น ต่อรูปแบบการไหล, ความดันลด และการถ่ายเทความร้อน
2. ควรศึกษาผลของการใช้ของไหลทำงานประเภทอื่น เช่น สารทำความเย็นชนิดต่างๆ หรือของไหลนาโน เป็นต้น และทดลองภายใต้สภาวะที่มีการเดือด เพื่อศึกษารูปแบบการไหล, ความดันลด และการถ่ายเทความร้อน



บรรณานุกรม

Ambatipudi and Rahman, **Analysis of Conjugate Heat Transfer in Microchannel Heat Sinks**, Numerical Heat Transfer Applications 37(7):711-731, June 2000

Amine Meziou et. al, **Low-Dimensional Modeling of Transient Two-Phase Flow in Pipelines** J. Dyn. Sys., Meas., Control 138(10), 101008 ,Jul 14, 2016

A. N. DRAVID, K. A. SMITH, E. W. MERRILL and P. L. T. BRIAN, **Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes**. A./Ch.E. J117, 11141122(1971).

Bao Z.Y., Fletcher D.F. and Haynes B.S.,2000 **An experimental study of gas-liquid flow in a narrow conduit**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43 : 2313-2324.

Betz A.R., Attinger D., 2010, **Can segmented flow enhance heat transfer in microchannel heat sinks?**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53 : 3683–3691.

Chuanshuai Dong & Takashi Hibiki, **Heat transfer correlation for two-component two-phase slug flow in horizontal pipes**, Applied Thermal Engineering 141, 2018

Choo K. and Kim S. J., 2011, **Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics of Nonboiling Two-Phase Flow in Microchannels**, Journal of Heat Transfer, 133 : 1-7.

D.B. Tuckerman, R.F.W. Pease, **High-performance heat-sinking for VLSI**, IEEE Electron. Device L. 2 (5) (1981) 126-129.

F. Schonfeld, S. Hardt, **Simulation of helical flows in micro channels**, AIChE J. 50 (2004) 771-778.

Gnielinski, V.: **On heat transfer in tubes**, Int. J. Heat Mass Transfer, 63 (2013) 134-140.

Hetsroni G., Mosyak A., Pogrebnyak E. and Segal Z., 2009, **Heat transfer of gas-liquid mixture in micro-channel heat sink**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52 : 3963–3971.

H.A. Mohammed, P. Gunnasegaran, N.H. Shuaib, **Numerical simulation of heat transfer enhancement in wavy microchannel heat sink**, Mechanical Eng., Universiti

- R.C., Martinelli, R.W., 1949. **Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two component flow in pipes**, Chem. Eng. Progr. 45, pp. 39–48.
- Tenaga Nasional, Malaysia, Int. Communications in Heat and Mass Transf. 38 (2011) 63–68.
- H.M. Metwally, R.M. Manglik, **Enhanced heat transfer due to curvature induced lateral vortices in laminar flows in sinusoidal corrugated-plate channels**, Int. J. Heat Mass Transfer 47 (10–11) (2004) 2282–2292.
- McAdams, W. H., Woods, W. K. and Heroman, L. C., 1942. **Vaporization inside Horizontal Tubes. II -Benzene-Oil Mixtures**, Trans. ASME, vol. 64, no. 3, pp. 193–200,
- N.R. Rosaguti, D.F. Fletcher, B.S. Haynes, **Laminar flow and heat transfer in a periodic serpentine channel**, Chem. Eng. Technol. 28 (3) (2005) 353-361.
- Philip E. Haines, **Dean vortices in finite-aspect-ratio ducts**, Journal of Fluid Mechanics 716:8, February 2013
- P.S. Lee, S.V. Garimella, D. Liu, **Investigation of heat transfer in rectangular microchannels**, Int. J. Heat Mass Transf. 48 (2005) 1688-1704.
- R.J. Phillips, **Microchannel Heat Sinks**, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. (1987)
- R.K. Shah and A. L. London, 1978 **Laminar flow forced convection in ducts**, Academic Press, New York, pp. 1-477.
- S.M. Hashemi, M.A. Akhavan-Behabadi, **An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux**, Int. Commun. Heat Mass Transfer 39 (1) (2012) 144–151.
- Sieder, E. C. Tate, **Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes**. Ind. Eng. Chem. 28(1936) 1429-1436
- Saisorn S. and Wongwises S., **Adiabatic two-phase gas-liquid flow behaviors during upward flow in a vertical circular micro-channel**, Experimental Thermal and Fluid Science, 69 : 158–168.
- S.M. Hashemi, M.A. Akhavan-Behabadi, **An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal**

helically coiled tube under constant heat flux, *Int. Commun. HeatMass Transfer* 39 (1) (2012) 144–151.

Triplett K.A., Ghiaasiaan S.M., Abdel-Khalik S.I. and Sadowski D.L, **Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns**, *International Journal of Multiphase Flow*, 25: 377-394.

T.M. Harms, **Heat transfer and fluid flow in deep rectangular liquid-cooled microchannels etched in a (100) silicon substrate**, Master's thesis, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, 1997.

T.M. Harms, M. Kazmierczak, F.M. Gerner, A. Holke, H.t. Henderson, J. Pilchowski, K. Baker, **Experimental investigation of heat transfer and pressure drop through deep microchannels in a (110) silicon substrate**, *Proc. ASME Heat transfer Division 1*, ASME/HTD, vol. 351, 1997, pp. 347-357.

Wei L., Pan L.M., Zhao Y.M., Ren Q.Y. and Zhang W.Z., 2017 **Numerical study of adiabatic two-phase flow patterns in vertical rectangular narrow channels**, *Applied Thermal Engineering*, 110 : 1101–1110.

Y. Sui, C.J. Teo, P.S. Lee, Y.T. Chew, C. Shu, **Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels**, *Mechanical Eng., National University of Singapore, Singapore*, *Int. J. of Heat and Mass Transf.* 53 (2010) 2760-2772.

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ยกตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล

สมมติการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 0.5 LPM

$T_{in} (^{\circ}C)$	$T_{out} (^{\circ}C)$	$T_{ave.fl} (^{\circ}C)$	$T_{ave. copper} (^{\circ}C)$	$T_{air inlet} (^{\circ}C)$	$T_{wall} (K)$
25.30	27.46	26.38	29.24	25.00	300.90

1. สมมติค่า $\eta_i = 1.00$

2. แทนค่าลงในสมการ $h = \frac{\dot{Q}}{N(A_{cb} + 2A_{cs}\eta_w)(T_w - T_m)}$

$$h = \frac{30.10(W)}{26 \times (0.000032(m^2) + (2 \times 1 \times 0.00002(m^2))) \times (300.9(K) - (26.38 + 273)(K))}$$

$$h = 7817.861376(W / m^2 \cdot K)$$

4. แทนค่า h ลงในสมการ $m^2 = \frac{2h}{k_{cu} S_f}$

$$m^2 = \frac{2 \times 7817.861376(W / m^2 \cdot K)}{399.8278(W / m \cdot K) \times 0.005(m)}$$

$$m = 279.6645992$$

5. แทนค่า m ลงในสมการ $\eta_f = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f}$

$$\eta_f = \frac{\tanh(279.6645992 \times 0.0005)}{279.6645992 \times 0.0005}$$

$$\eta_f = 0.993532885$$

6. จะพบว่า $\eta_i \neq \eta_f$

7. สมมติ η_i ขึ้นใหม่และทำตามขั้นตอนที่ 2-5 จน $\eta_i = \eta_f$ จะได้ $h = 7846.152578W / m^2 \cdot K$

ยกตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย

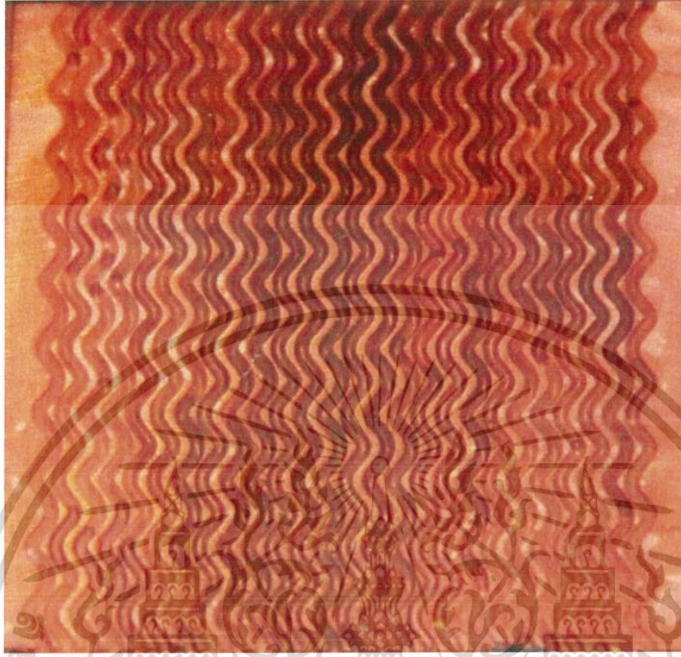
$$Nu = \frac{hD_h}{k}$$

$$Nu = \frac{7846.15(W / m^2 \cdot K) \times 0.00062}{0.61172(W / m \cdot K)}$$

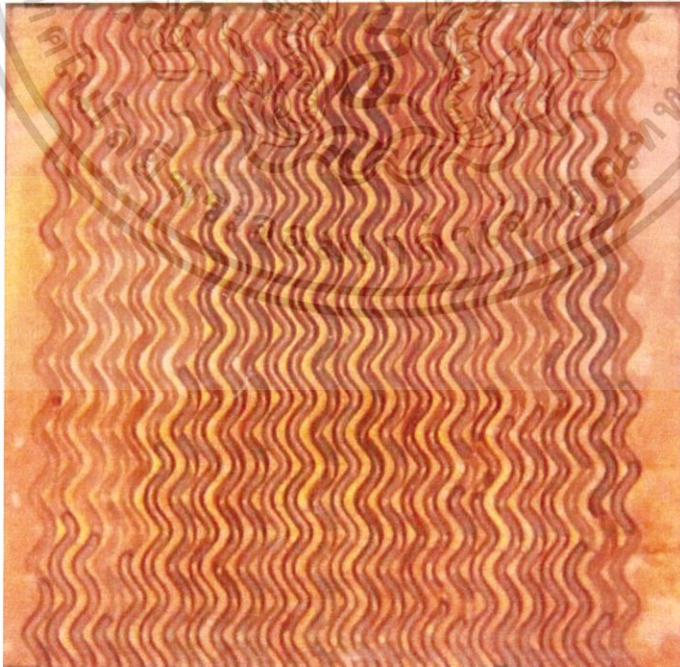
$$Nu = 7.9523$$

ภาคผนวก ข

รูปแบบการไหลในท่อไมโครแชนแนลรูปคลื่น

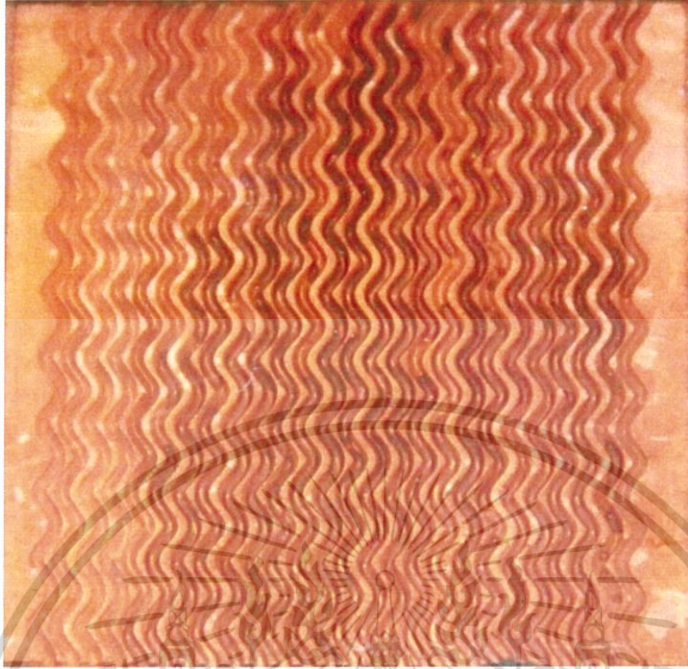


รูปที่ 1 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.50 LPM

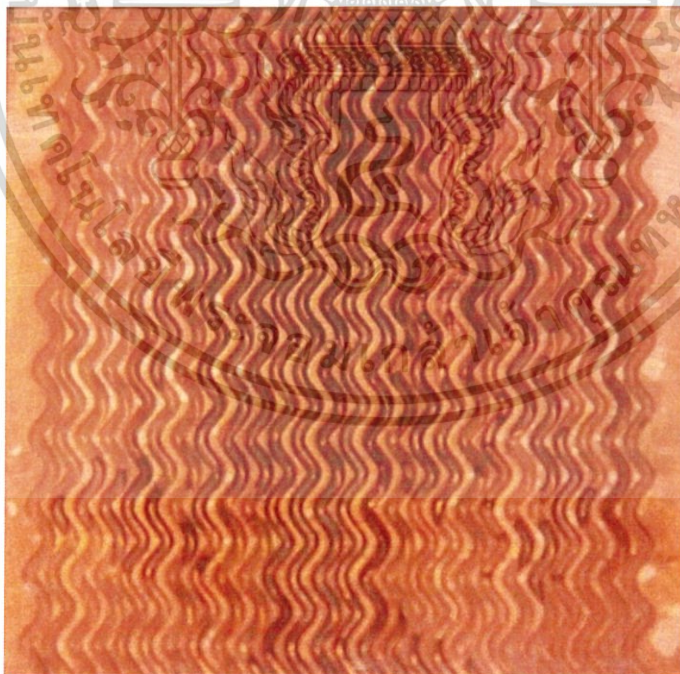


รูปที่ 2 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.75 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.00 LPM



รูปที่ 4 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.25 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

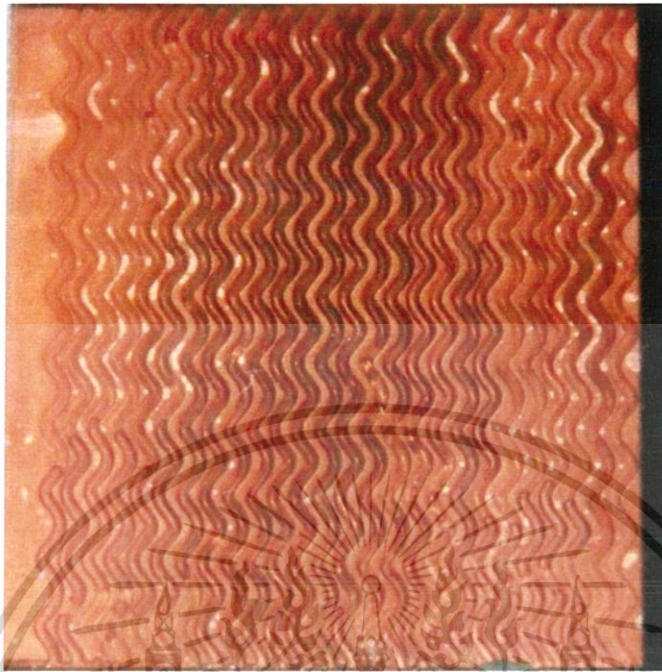


รูปที่ 5 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.50 LPM

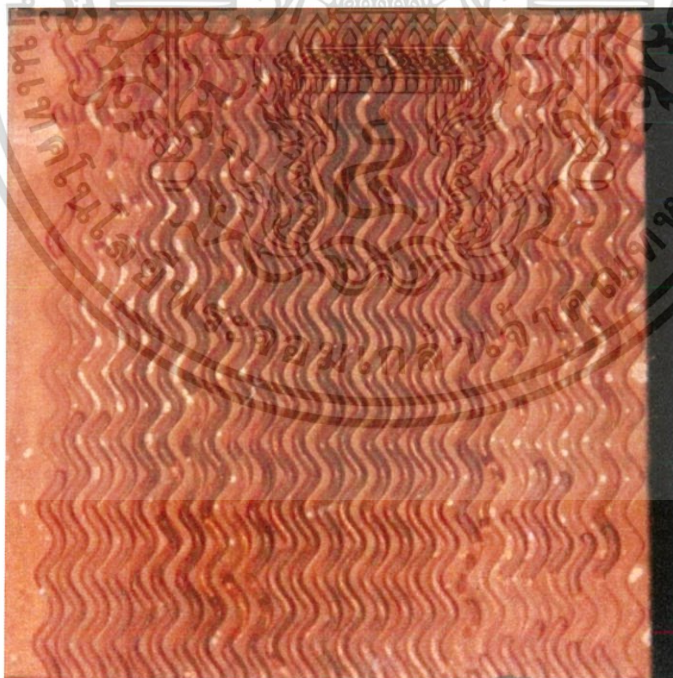


รูปที่ 6 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.50 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

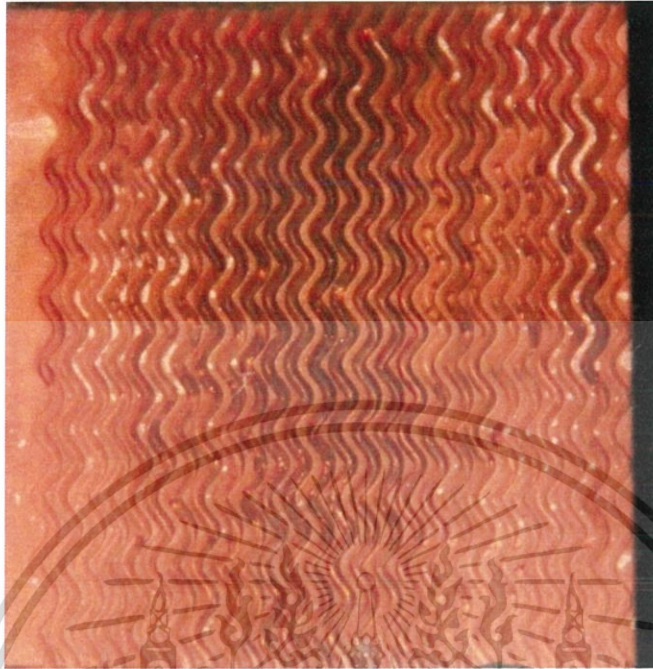


รูปที่ 7 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.75 LPM

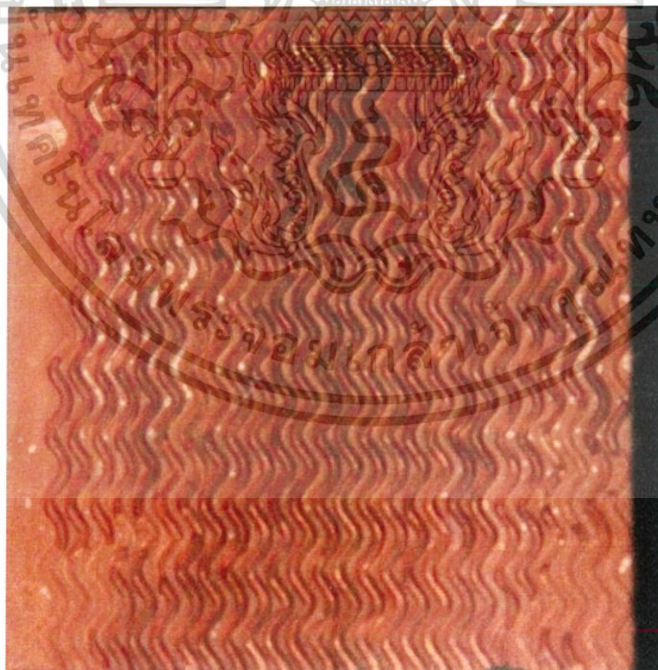


รูปที่ 8 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.00 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

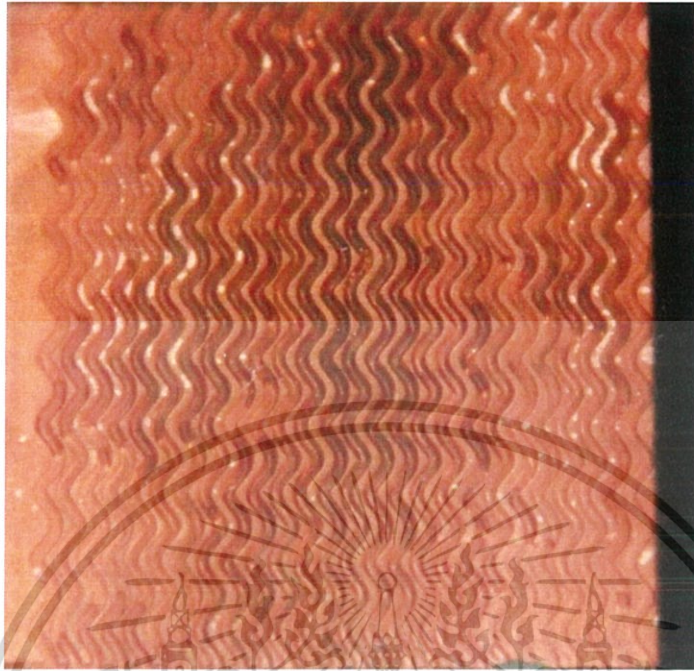


รูปที่ 9 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.25 LPM

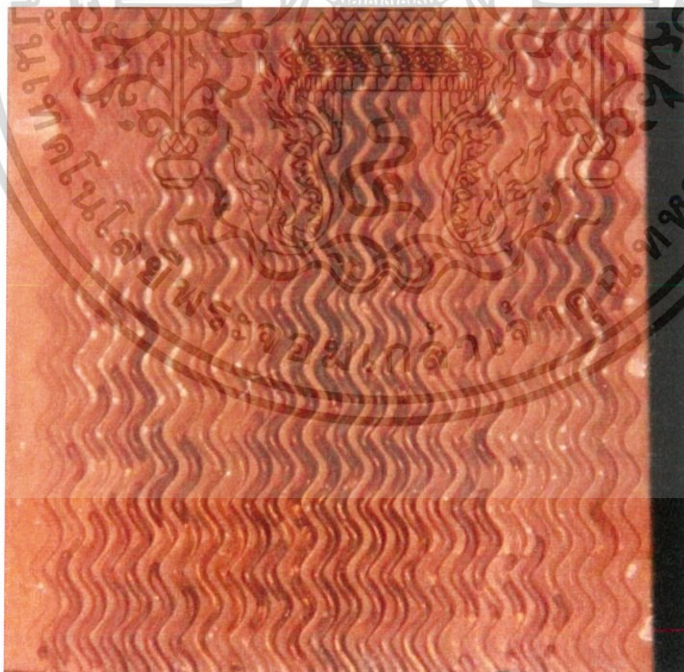


รูปที่ 10 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.50 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

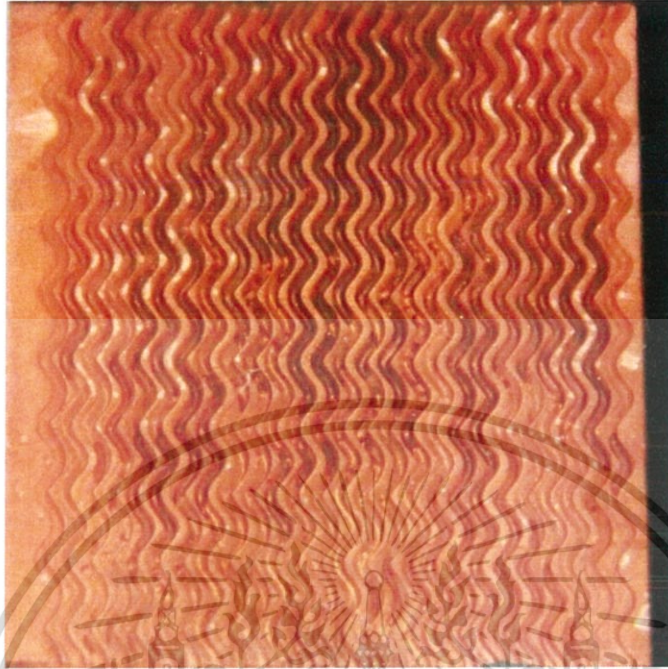


รูปที่ 11 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.50 LPM

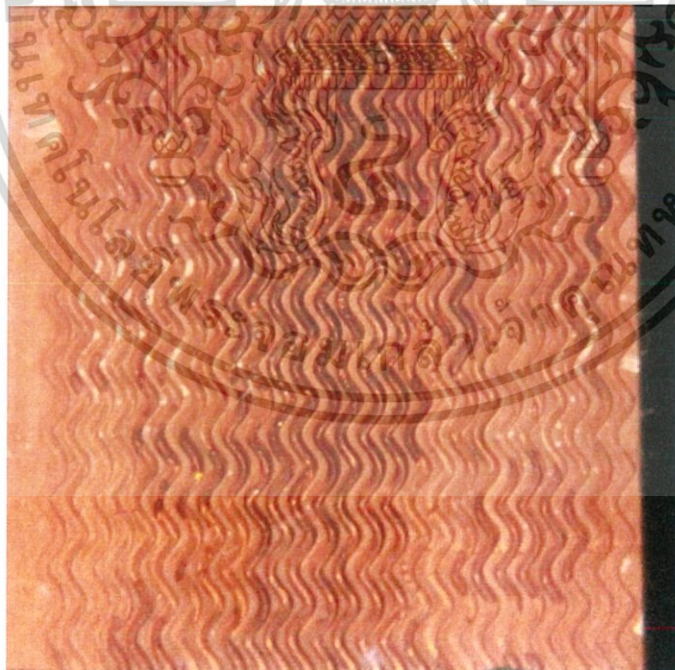


รูปที่ 12 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.75 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

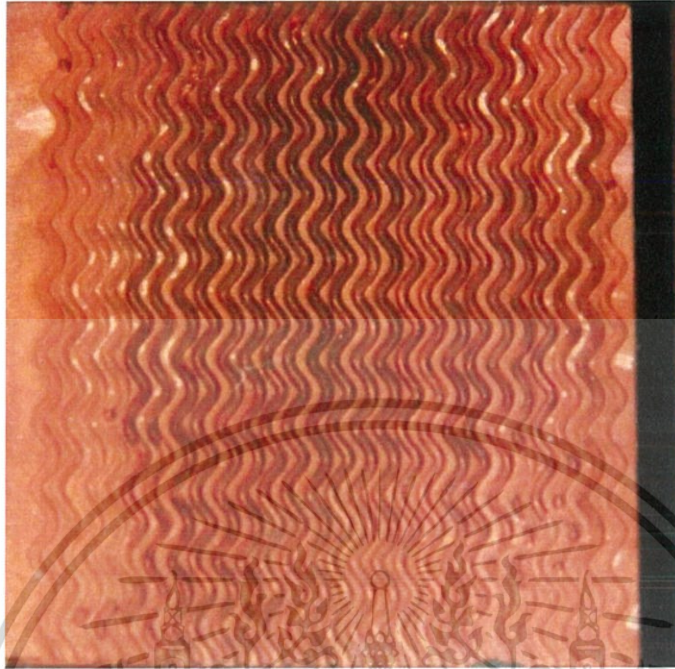


รูปที่ 13 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.00 LPM

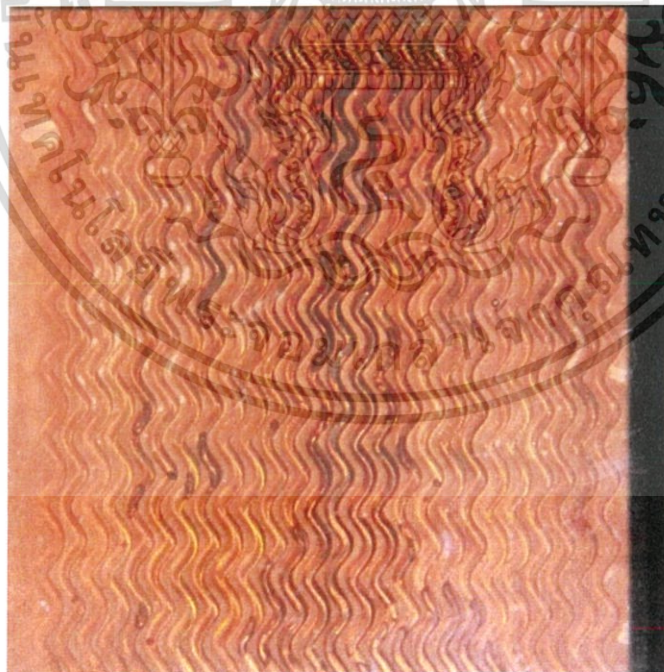


รูปที่ 14 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.25 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

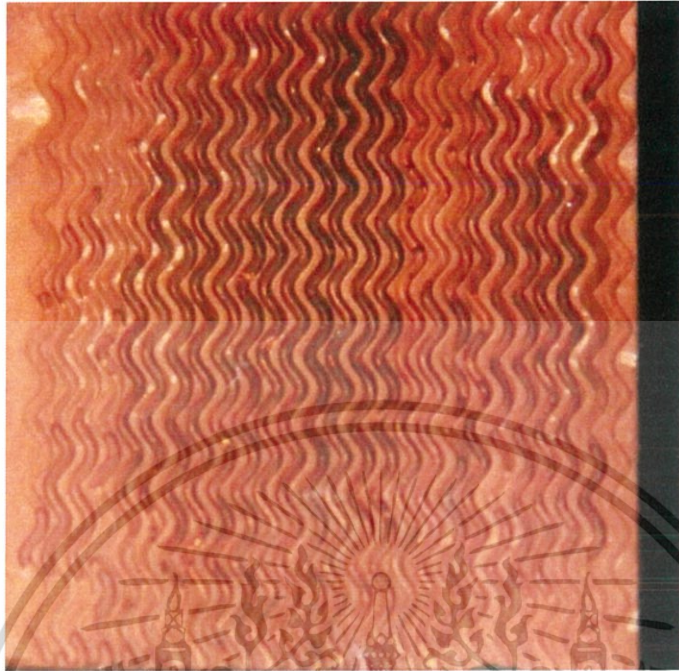


รูปที่ 15 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.50 LPM

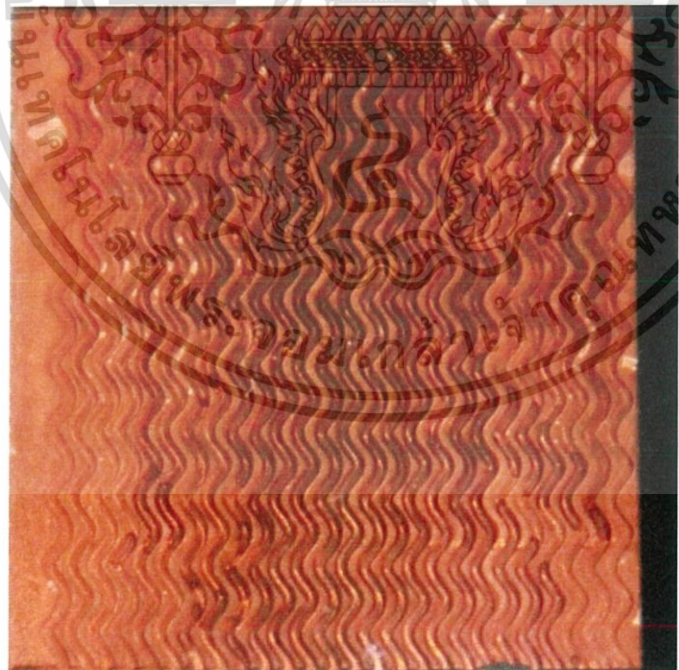


รูปที่ 16 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.50 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

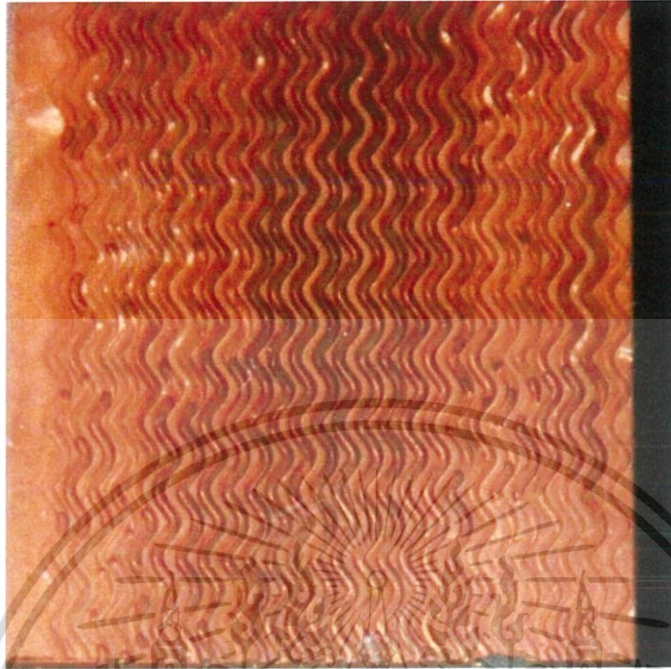


รูปที่ 17 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.75 LPM

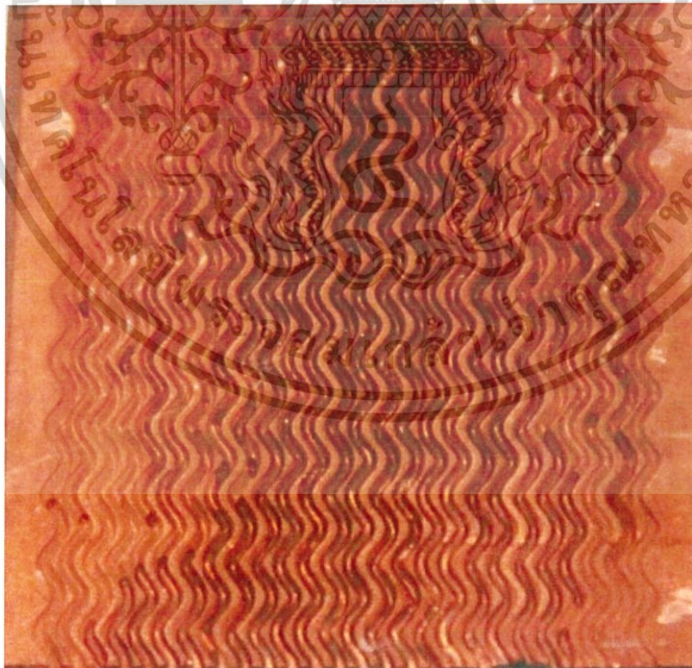


รูปที่ 18 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.00 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

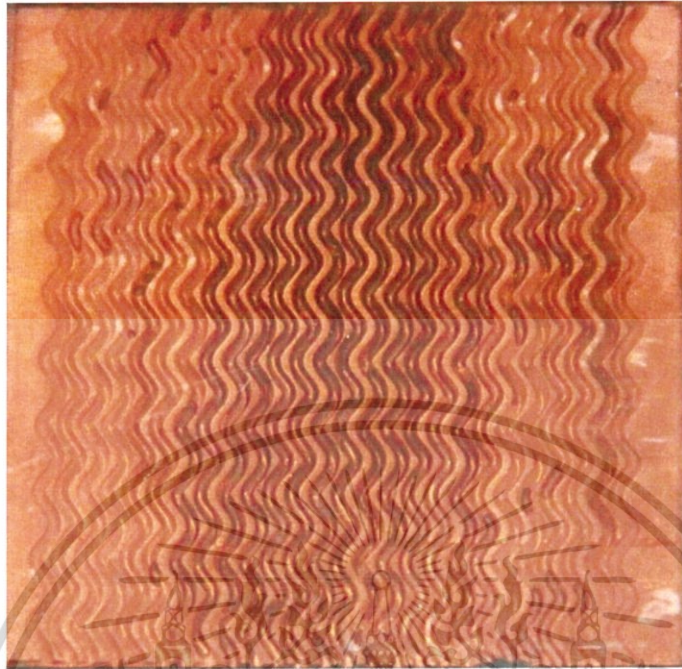


รูปที่ 19 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.25 LPM

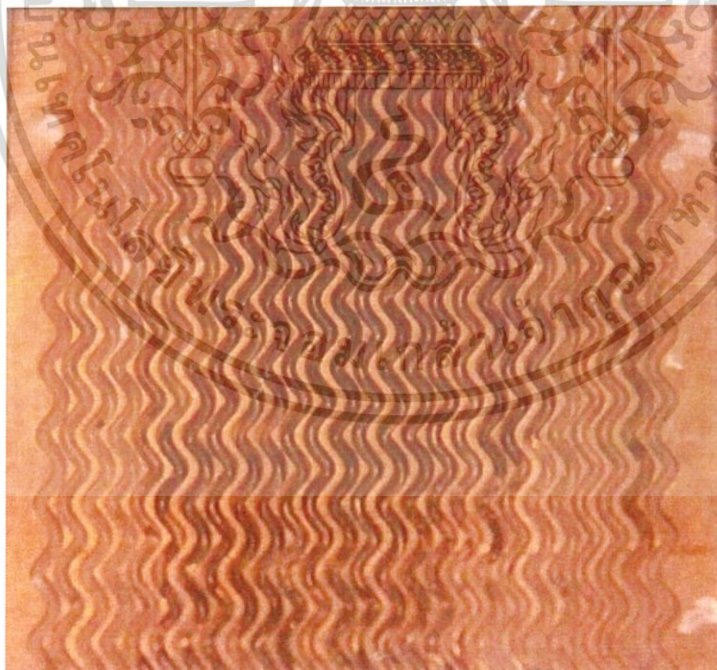


รูปที่ 20 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.50 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

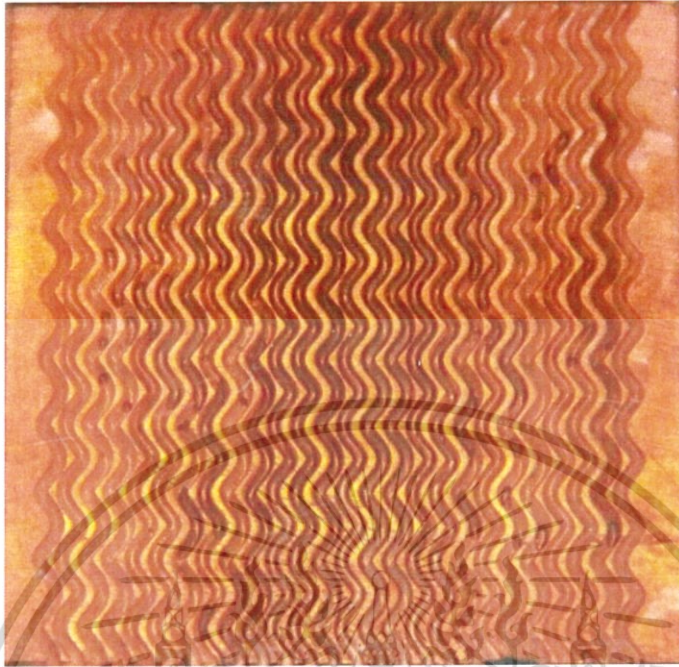


รูปที่ 21 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.50 LPM

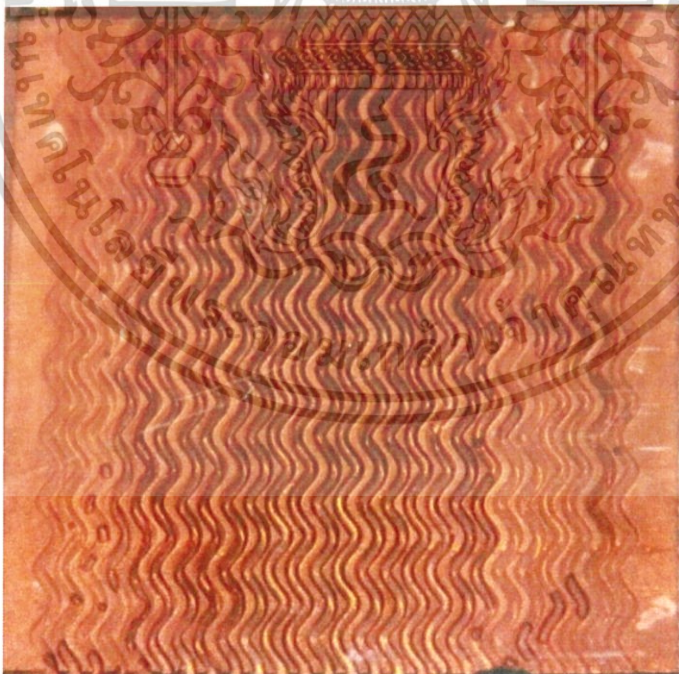


รูปที่ 22 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.75 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

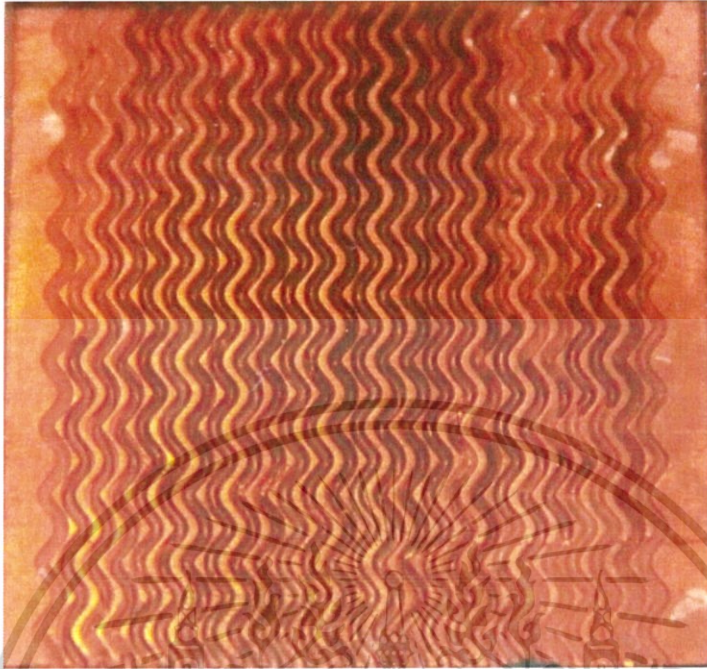


รูปที่ 23 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.00 LPM



รูปที่ 24 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.25 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

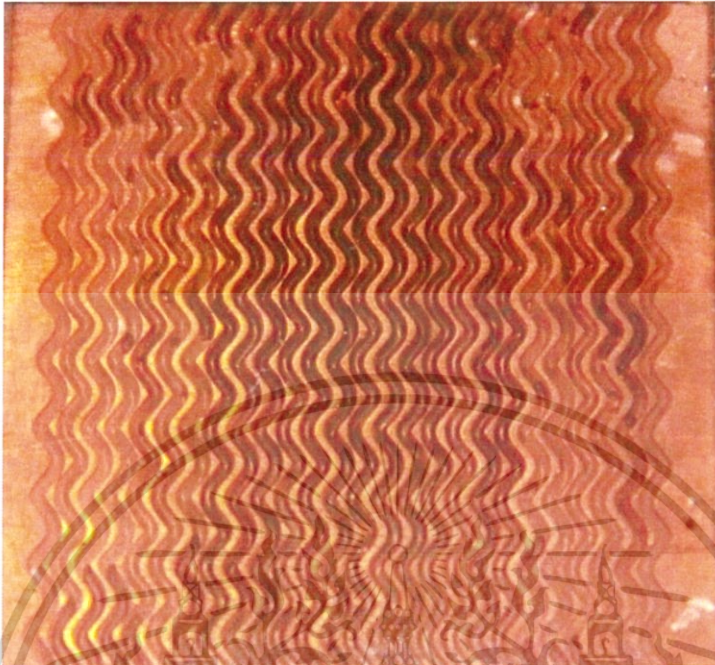


รูปที่ 25 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.50 LPM

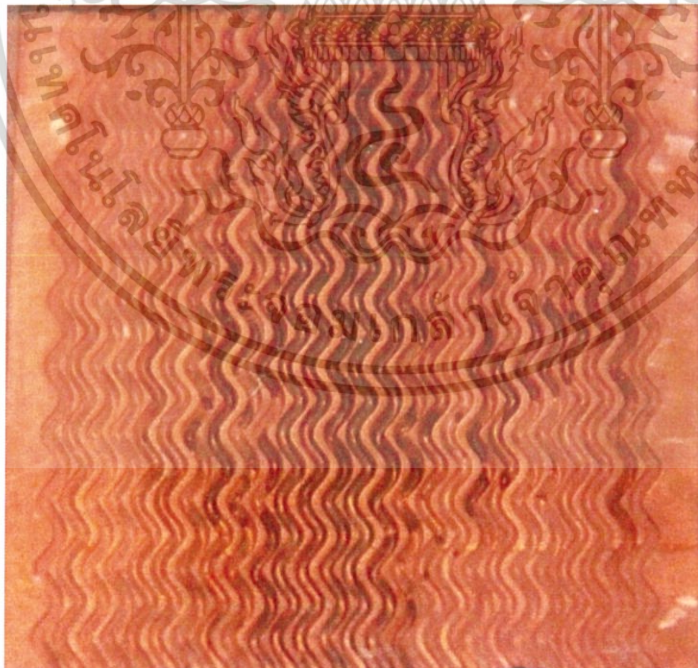


รูปที่ 26 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 350 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.50 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

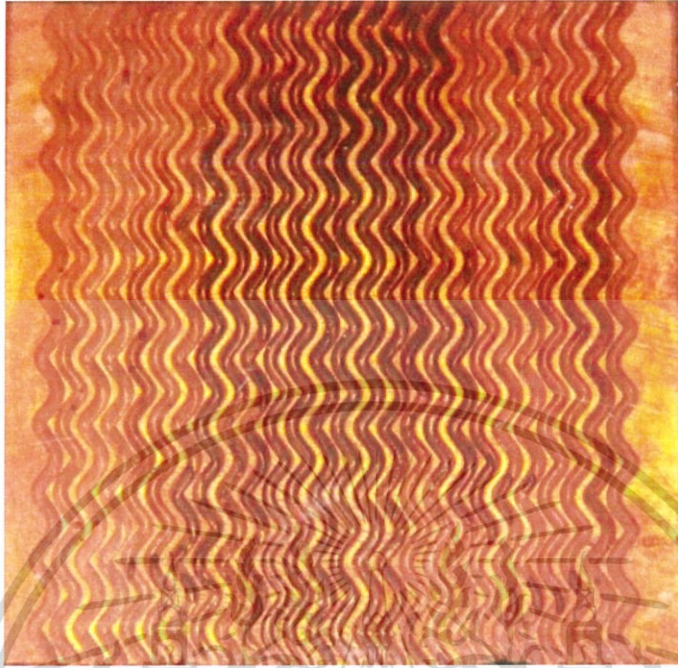


รูปที่ 27 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 350 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.75 LPM

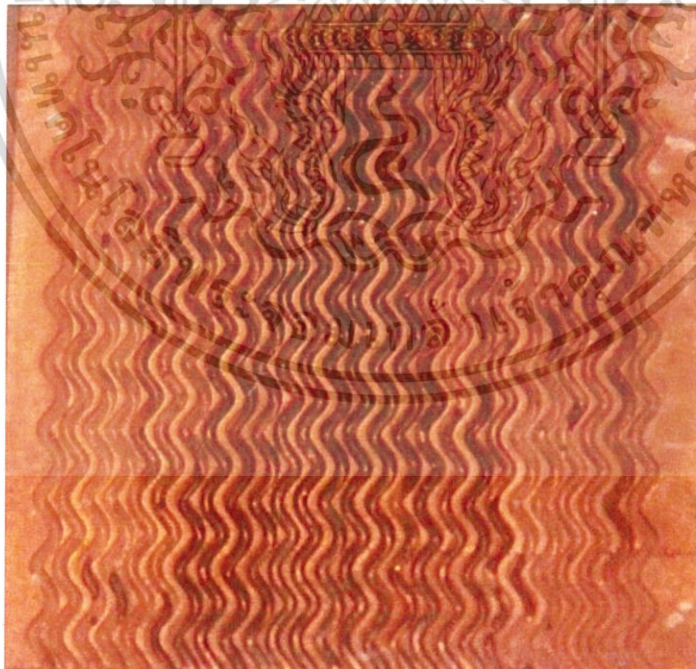


รูปที่ 28 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 350 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.00 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

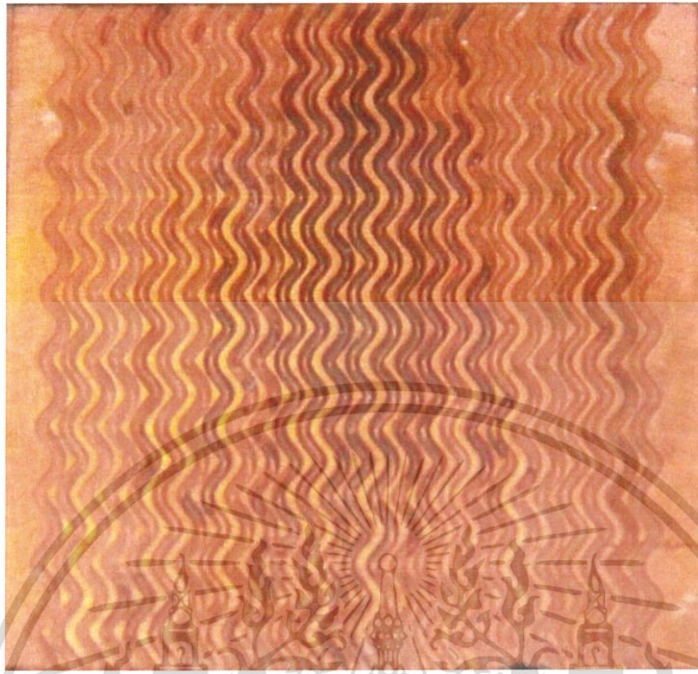


รูปที่ 29 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 350 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.25 LPM



รูปที่ 30 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 350 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.50 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 400 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.50 LPM

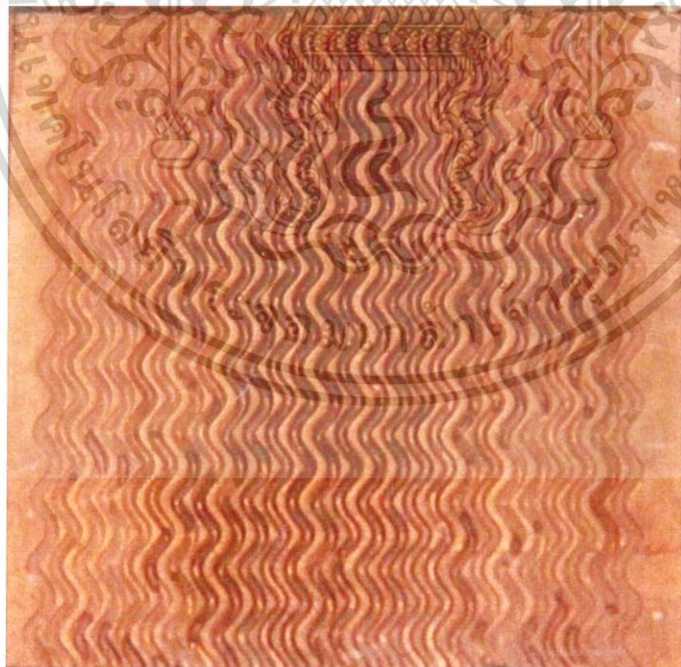


รูปที่ 32 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 400 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 0.75 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 33 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 400 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.00 LPM



รูปที่ 34 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 400 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.25 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 35 รูปแบบการไหลสองเฟสที่มีอัตราการไหลของน้ำ 400 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1.50 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้