

ผลของรูปร่างของท่อไมโครเซนเนลต่อการถ่ายเทความร้อน

EFFECTS OF MICROCHANNEL GEOMETRY ON HEAT TRANSFER



พิรวิชญ์ ธิติปัญญาวงศ์

วรวิช อนันต์ธนาโรจน์

สุทธิชัย ปัทมาวิไล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF MICROCHANNEL GEOMETRY ON HEAT TRANSFER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGUT'S INTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

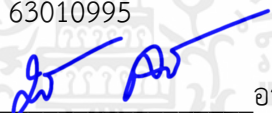
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของรูปร่างของท่อไมโครแชนแนลต่อการถ่ายเทความร้อน

EFFECTS OF MICROCHANNEL GEOMETRY ON HEAT TRANSFER

ผู้จัดทำ

1. นาย พีรวิชญ์ ธิติปัญญาวงศ์ รหัสประจำตัว 63010700
2. นาย วรวิษ อนันต์ธนาโรจน์ รหัสประจำตัว 63010851
3. นาย สุทธิชัย ปัทมาวิไล รหัสประจำตัว 63010995

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร. มรรุส สุชาติวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลของรูปร่างของท่อไมโครเซนเนลต่อการถ่ายเทความร้อน

นายพีรวิชญ์ ธิติปัญญาวงศ์ 63010700

นายวรวิช อนันต์ธนาโรจน์ 63010851

นายสุทธิชัย ปัทมาวิไล 63010995

ผศ.ดร. มธุรส สุชาตะวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2566

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขการไหลสถานะเดียวโดยใช้น้ำเป็นตัวพาความร้อนภายในไมโครเซนเนล ศึกษาจากจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และความดันตกภายในไมโครเซนเนลรูปแบบต่างๆ ได้แก่ แบบคลื่นรูปไซน์ ,แบบคลื่นรูปวงรี และแบบท่อตรง ส่วนที่ 2 ทำการศึกษาผลของแอมพลิจูดของไมโครเซนเนลแบบคลื่นรูปวงรีที่ขนาด 0.4 ,0.6 ,0.8 และ 1.0 mm. เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และความดันตก ส่วนที่ 3 ทำการศึกษาผลของความยาวคลื่นของไมโครเซนเนลแบบคลื่นรูปวงรีที่ขนาด 3, 4, 6 และ 8 mm. เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และความดันตก

ผลจากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของไมโครเซนเนลที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิกมากไปน้อยคือ ไมโครเซนเนลแบบคลื่นรูปวงรี ,ไมโครเซนเนลแบบคลื่นรูปไซน์ และไมโครเซนเนลแบบท่อตรง ตามลำดับ ในส่วนของแอมพลิจูดนั้นพบว่ายิ่งแอมพลิจูดมากยิ่งขึ้นยิ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิกมาก และผลของความยาวคลื่นพบว่ายิ่งความยาวคลื่นน้อยยิ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิกมาก

## EFFECTS OF MICROCHANNEL GEOMETRY ON HEAT TRANSFER

Piravit Thitipanyavong 63010700

Worawit Ananthanarote 63010851

Sutthichai Patthamawilai 63010995

Ass.Prof.Dr.Maurose Suchatawat Advisor

Year 2023

### ABSTRACT

This project presents a numerical study of single-phase water flow in horizontal microchannels. The work is divided into three parts: part 1 compares the heat transfer and the pressure drop occur when water flows through microchannels. Three different shapes of the microchannels, including the sinusoidal, the elliptical and the straight microchannels are studied. The second part is focused on effects of the wavy amplitudes. The wavy amplitude of 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 mm are simulated and the heat transfer and the pressure drop are compared. The third part studies the effects of the wavelength. The wavelength values considered are 3, 4, 6 and 8 mm.

It is forward that the elliptical wave shape microchannel gives the highest thermohydraulic efficiency followed by the sinusoidal and the straight microchannels, respectively. For the amplitude, the results showed that the greater the amplitude, the higher the thermohydraulic efficiency. For wavelength, it is found that the smaller wavelength gives the higher the thermohydraulic efficiency.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.มจรุส สุชาตะวัฒน์ อาจารย์ผู้ควบคุมดูแลปริญญาานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางรวมทั้งปรับปรุงแก้ไข ปัญหา ข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำการวิจัยด้วยความเอาใจใส่เสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณ เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ผู้ร่วมทำวิจัยทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ปรึกษา และให้คำแนะนำกันและกัน ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่งซึ่งได้เลี้ยงดู ให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่รวมถึงอุปกรณ์ที่จำเป็นแก่คณะผู้วิจัย ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ คณะผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นายพีรวิษณุ ธิติปัญญาวงศ์

นายวรวิช อนันต์ธนาโรจน์

นายสุทธิชัย ปัทมาวิไล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษา .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญภาพ .....	VIII
ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์ .....	X
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	1
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย .....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1.1 การไหลภายในท่อ .....	4
2.1.1.1 ความแตกต่างระหว่างการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน .....	4
2.1.1.2 การเปลี่ยนผ่านจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน.....	6
2.1.1.3 การไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนล .....	6
2.1.2 กลไกการถ่ายเทความร้อน .....	6
2.1.2.1 การนำความร้อนภายในผนังของไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งเป็นของแข็ง .....	6
2.1.2.2 การพาความร้อนภายในของเหลวหล่อเย็นที่ไหลผ่านไมโครโปรเซสเซอร์ .....	7
2.1.3 พลศาสตร์ของไหลในไมโครแชนเนล .....	9
2.1.3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตความเร็วและอุณหภูมิ .....	9
2.1.3.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการไหลในไมโครแชนเนล .....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.4 เลขนัสเซลล์และความดันตก .....	10
2.1.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเลขนัสเซลล์ในฐานะค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อน .....	10
2.1.4.2 ความสำคัญของความดันตกของการไหลในไมโครแชนเนล .....	11
2.1.4.3 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลล์และเลขเรย์โนลด์ .....	12
2.1.5 เรขาคณิตไมโครแชนเนลแบบคลื่น .....	14
2.1.5.1 พื้นฐานทางทฤษฎีสำหรับการใช้รูปทรงแบบคลื่น .....	14
2.1.5.2 รูปร่างของท่อไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปไซน์ และแบบคลื่นรูป วงรีในไมโครแชนเนล .....	16
2.1.6 การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและการจำลอง .....	17
2.1.6.1 พื้นฐานของการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขในพลศาสตร์ของไหล .....	17
2.1.6.2 พื้นฐานทางทฤษฎีของสมการ Navier-Stokes สำหรับ การจำลองการไหล .....	18
2.2 ทบทวนวรรณกรรม .....	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	25
3.1 การเลือกขนาดเมชที่เหมาะสม (Mesh Independence) .....	25
3.1.1 งานวิจัยที่ใช้ในการตรวจสอบผล .....	25
3.1.2 การแบ่งเมชที่ใช้ในการจำลอง (Meshing) .....	25
3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition) .....	28
3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) .....	39
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา .....	40
บทที่ 4 ผลการศึกษา .....	43
4.1 อิทธิพลของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับรูปร่างของไมโครแชนเนล .....	44
4.2 ผลของรูปร่างที่มีต่อการถ่ายโอนความร้อนและความดันตก .....	45
4.3 สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิก .....	49
4.4 คอนทิวอร์อุณหภูมิจึงและสตีมีไลน์ที่หน้าตัดต่างๆ .....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	61
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	62
บรรณานุกรม .....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ VI อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของโดเมนของไทยและของแข็ง .....	18
2.2 ค่าตัวเลขประสิทธิภาพที่แอมพลิจูดต่างๆ .....	24
3.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเลขนัยสำคัญของผลการจำลอง .....	38
3.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าแฟคเตอร์ความเสียหายของผลการจำลอง .....	39
3.3 แบบจำลองที่ทำการศึกษา .....	41
4.1 เปรียบเทียบความเข้มของการไหลทุติยภูมิเฉลี่ยระหว่างไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และแบบ แบบคลื่นรูปไซน์ .....	46
4.2 เปรียบเทียบเลขนัยสำคัญของแฟคเตอร์ความเสียหาย และสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโคร แซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และแบบคลื่นรูปวงรีที่แอมพลิจูดต่างๆที่เลขเรย์โนลด์ค่าเดียวกัน .....	52
4.3 เปรียบเทียบเลขนัยสำคัญของแฟคเตอร์ความเสียหาย และสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกระหว่าง ไมโครแซนแนล หมายเลขเดียวกัน .....	52
4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของสมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกสำหรับช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา .....	54

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงตัวแปรขนาดของท่อและพื้นที่ผิวต่างๆ .....	5
2.2 แสดงการนำความร้อนในซึบสเตรตและการพาความร้อนในของไหล .....	8
2.3 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าเฉลี่ยเลขคณิต จากการทดลอง และ การจำลองเชิงตัวเลขกับเลขเรย์โนลด์ .....	23
3.1 แสดงแบบจำลองของท่อไมโครแชนเนลแบบท่อตรง .....	26
3.2 แสดงการตั้งค่าเมช .....	27
3.3 แสดงส่วนต่างๆของท่อไมโครแชนเนลแบบท่อตรง .....	27
3.4 แสดงการตั้งค่าทั่วไป .....	28
3.5 แสดงการตั้งค่าแบบจำลอง .....	29
3.6 แสดงการตั้งค่า material ของ fluid zone .....	29
3.7 แสดงการตั้งค่า material ของ solid zone .....	30
3.8 แสดงการตั้งค่าความเร็วของน้ำที่ทางเข้า .....	30
3.9 แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้า .....	31
3.10 แสดงการตั้งค่าที่ทางออก .....	31
3.11 แสดงการตั้งค่า heat flux .....	32
3.12 แสดงการตั้งค่า substrate-fluid interface .....	32
3.13 แสดงการตั้งค่า substrate-fluid interface .....	33
3.14 แสดงการตั้งค่าผนังด้านที่เหลือ .....	33
3.15 แสดงการหาผลเฉลยความดันและความเร็ว .....	34
3.16 แสดงการตั้งค่า Residual .....	35
3.17 แสดงการสมมติค่าตอบเริ่มต้น .....	36
3.18 แสดงการตั้งค่า Run Calculation .....	37
3.19 แสดงค่าเลขคณิตเฉลี่ยที่จำนวนเมช 270K, 320K และ 420K elements เทียบกับผล การจำลอง ของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7] .....	37
3.20 แสดงค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ยที่จำนวนเมช 270K, 320K และ 420K elements เทียบ กับผลการจำลอง ของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7] .....	38
3.21 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของเลขคณิตของแบบจำลอง .....	39
3.22 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของแฟคเตอร์ความเสียดทานของแบบจำลอง .....	40

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
4.1(ก-ข) กราฟแสดงอิทธิพลของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับรูปร่างของ ไมโครเซนแนลที่มี ต่อเลขนัสเซิลต์และแฟคเตอร์ความเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ต์ต่อ .....	44
4.2(ก-ข) กราฟแสดงค่า $De/Re$ ที่ตำแหน่ง $x=3$ ถึง $x=6$ mm ของ (ก) ไมโครเซนแนลแบบ คลื่นรูปไซน์ $A = 0.6$ mm $\lambda = 3$ mm (ข) ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี $A = 0.6$ mm $\lambda = 3$ mm .....	45
4.3 กราฟเปรียบเทียบ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง $Nu$ เฉลี่ยตลอดความ ยาวกับ $Re$ (ข) ความสัมพันธ์ ระหว่าง $f$ เฉลี่ยตลอดความยาวกับ $Re$ ระหว่างไมโคร เซนแนลแบบเส้นตรง แบบคลื่นรูปไซน์ และ แบบคลื่นรูปวงรีที่เลขเรย์โนลด์ต์ต่างๆ .....	48
4.4 เลขนัสเซิลต์ที่แอมพลิจูดทั้ง 4 กรณีของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี,แบบคลื่นรูปไซน์ และ แบบเส้นตรง .....	49
4.5 เลขนัสเซิลต์ที่แอมพลิจูดทั้ง 4 กรณีของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่นรูปไซน์ เมื่อ เทียบกับไมโครเซนแนลแบบเส้นตรง .....	50
4.6 แฟคเตอร์ความเสียดทานที่แอมพลิจูดทั้ง 4 กรณีของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี,แบบคลื่น รูปไซน์ และแบบเส้นตรง .....	50
4.7 แฟคเตอร์ความเสียดทานที่แอมพลิจูดทั้ง 4 กรณีของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่น รูปไซน์ เมื่อเทียบกับไมโครเซนแนลแบบเส้นตรง .....	51
4.8 เปรียบเทียบสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลแบบ คลื่นรูปไซน์และแบบคลื่นรูปวงรีที่ แอมพลิจูดต่างๆที่เลขเรย์โนลด์ต์ค่าเดียวกัน .....	51
4.9(ก-ค) เปรียบเทียบสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลแบบคลื่น รูปวงรีที่มีแอมพลิจูด 1 mm และความยาวคลื่นต่างๆที่เลขเรย์โนลด์ต์ค่าเดียวกัน .....	56
4.10 แผนภาพอุณหภูมิของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่นรูปไซน์ โดย (ก) ที่ $Re=160$ และ (ข) ที่ $Re=700$ .....	58
4.11 แผนภาพเส้นทางการไหลของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่นรูปไซน์ โดย (ก) ที่ $Re=160$ และ (ข) ที่ $Re=700$ .....	59
4.12 แสดงกราฟเส้นของไมโครเซนแนล (a) E2 และ (b) S2 กับตำแหน่งที่คำนวณการถ่ายเทความร้อน และแฟคเตอร์แรงเสียดทาน .....	60

## ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์

$A$	แอมพลิจูดของคลื่นของไมโครแชนเนล (Wavy amplitude) ,m
$A_{base}$	พื้นที่ฐานของซับสเตรต (Base area of the copper substrate) ,m <sup>2</sup>
$A_c$	พื้นที่หน้าตัดของไมโครแชนเนล (Cross-sectional area of the channel) ,m <sup>2</sup>
$A_s$	พื้นที่ผิวทั้งหมดที่รอยต่อระหว่างซับสเตรตกับของไหล (Total surface area of the bottom wall and the side walls) ,m <sup>2</sup>
$C_{pf}$	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่ (Specific heat at constant pressure of the fluid) ,J/kg·K
$C_{ps}$	ความร้อนจำเพาะของซับสเตรตที่ความดันคงที่ (Specific heat at constant pressure of the substrate) ,J/kg·K
$De$	เลขดีน (Dean number)
$D_h$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ,m
$f_{avg}$	แฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ย (Average friction factor)
$f_x$	แฟคเตอร์ความเสียดทานเฉพาะที่ (Local friction factor)
$h_{avg}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (Average heat transfer coefficient)
$h_x$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (Local heat transfer coefficient)
$H_c$	ความสูงของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Channel depth) ,m
$H_s$	ความสูงของซับสเตรต (Substrate depth) ,m
$J_x$	ค่าเฉลี่ยของความหมุนวนสัมบูรณ์ที่หน้าตัดที่กำหนด (Average of absolute vorticity at a given cross-section)
$k_f$	สภาพการนำความร้อนของของเหลว (Fluid thermal conductivity) ,W/m·K
$k_s$	สภาพการนำความร้อนของของแข็ง (Substrate thermal conductivity) ,W/m·K
$L$	ความยาวไมโครแชนเนล
$L_{h,laminar}$	ความยาวทางเข้าของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic entry length) ,m
$L_{t,laminar}$	ความยาวทางเข้าทางความร้อน (Thermal entry length) ,m
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล ,kg/s

## ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

N	จำนวนโหนดที่อยู่รอบนอกของหน้าตัด (Number of nodes on the periphery of a cross-section)
$Nu_{avg}$	เลขนัสเซิลต์เฉลี่ย (Average Nusselt number for the entire microchannel)
$Nu_x$	เลขนัสเซิลต์เฉพาะที่ (Local Nusselt number)
p	ความดัน (Pa)
P	เส้นรอบรูปของพื้นที่เปียก (Wetted perimeter) ,m
Pr	เลขพรันด์เทิล (Prandtl number)
$q_w$	ฟลักซ์ความร้อน (Heat flux applied at the bottom wall) ,W/m <sup>2</sup>
$R_c$	รัศมีความโค้งของตำแหน่งที่กำหนด (Radius of curvature) ,m
Re	เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)
$S_{gen}$	เอนโทรปีที่ถูกสร้างขึ้นเชิงปริมาตรทั้งหมด (Total entropy generation) ,J/K·m <sup>3</sup>
$S_{gen,f}$	เอนโทรปีที่ถูกสร้างขึ้นเชิงปริมาตรเนื่องจากความดันตกจากแรงเสียดทาน (Volumetric entropy generation due to frictional pressure drop) ,J/K·m <sup>3</sup>
$S_{gen,T}$	เอนโทรปีที่ถูกสร้างขึ้นเชิงปริมาตรเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน (volumetric entropy generation due to heat transfer) ,J/K·m <sup>3</sup>
Se	ความเข้มของการไหลทุติยภูมิ (Secondary flow intensity parameter)
$T_a$	อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient temperature) ,°C
$T_{in}$	อุณหภูมิของเหลวเฉลี่ยที่ระนาบทางเข้าของไมโครแชนเนล (Mean fluid temperature at channel inlet) ,°C
$T_m$	อุณหภูมิเฉลี่ยเลขคณิตของ $T_{in}$ และ $T_{out}$ (Arithmetic mean of $T_{in}$ and $T_{out}$ ) ,°C
$T_{out}$	อุณหภูมิของเหลวเฉลี่ยที่ระนาบทางออกของไมโครแชนเนล (Mean fluid temperature at the exit plane of the channel) ,°C
$T_w$	อุณหภูมิผนังเฉลี่ยตามความยาว (Length averaged wall temperature) ,°C
a	

## ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$T_{w,i}$	อุณหภูมิผนังที่โหนด i (Wall temperature at an i-th node) ,°C
$T_{f,x}$	อุณหภูมิของของไหลเฉลี่ยที่ระนาบที่ตั้งฉากกับการไหล (Mean fluid temperature at a plane normal to the flow) ,°C
$T_{w,x}$	อุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ระนาบที่ตั้งฉากกับการไหล (Average wall temperature at a plane normal to the flow) ,°C
$U$	เวกเตอร์ความเร็ว (Velocity vector) ,m/s
$U_m$	ความเร็วเฉลี่ย (Mean velocity) ,m/s
$V$	ปริมาตรของช่องไมโครแชนเนล (Channel volume) ,m <sup>3</sup>
$W_c$	ความกว้างของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Channel width) ,m
$W_s$	ความกว้างของซับสเตรต (Substrate width) ,m
$W_t$	ความหนาของผนัง (Wall thickness) ,m
$x$	ระยะตามแนวแกน x (x-coordinate) ,m
$y$	ระยะตามแนวแกน y (y-coordinate) ,m
$z$	ระยะตามแนวแกน z (z-coordinate) ,m
$\alpha$	การแพร่กระจายความร้อน (Thermal diffusivity) ,m <sup>2</sup> /s
$\nu$	ความหนืดจลน์ของของไหล (Kinematic viscosity) ,m <sup>2</sup> /s
$\mu$	ความหนืดไดนามิกของของเหลว (Dynamic viscosity) ,Pa·s
$\rho_f$	ความหนาแน่นของของเหลว (Fluid density) ,kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	ความหนาแน่นของของซับสเตรต (Substrate density) ,g/m <sup>3</sup>
$\Delta p$	ความดันตกจากแรงเสียดทานที่ถูกหาจากสมการ Darcy Weisbach (Frictional pressure drop across the channel) ,Pa
$\tau_{w,x}$	ความเค้นเฉือนที่ผนังเฉลี่ยที่ระนาบที่ตั้งฉากกับการไหล (Mean wall shear stress at location x) ,Pa
$\tau_{w,i}$	ความเค้นเฉือนที่ผนังที่โหนด i (Wall shear stress at an i-th node) ,Pa
$\eta$	ค่าพารามิเตอร์สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิก (Thermohydraulic performance parameter)
$\lambda$	ความยาวคลื่นของไมโครแชนเนล (Wavelength) ,m
$a$	อัตราส่วนกว้างยาว (Aspect ratio)

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการระบายความร้อนระดับไมโครถือเป็นสิ่งสำคัญของวิศวกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กกะทัดรัดและทรงพลังมากขึ้น ความต้องการในการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพมีมากขึ้น การย่อขนาดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทำให้มีความหนาแน่นของพลังงานสูงขึ้น ซึ่งหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเพียงพอ อาจส่งผลให้เกิดความร้อนสูงเกินไป ประสิทธิภาพลดลง หรือแม้แต่วินิจฉัยระบบล้มเหลว ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบช่องสัญญาณขนาดเล็กจึงกลายเป็นสิ่งสำคัญในการจัดการระบายความร้อนเหล่านี้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะด้วยเครือข่ายช่องสัญญาณขนาดเล็กที่ซับซ้อน มีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง ทำให้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการกระจายความร้อนในพื้นที่ที่จำกัด มีการใช้งานที่หลากหลาย ทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ระบบระบายความร้อนของยานยนต์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ รูปทรงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบช่องสัญญาณขนาดเล็กมีบทบาทสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพการระบายความร้อน โดยการกำหนดค่าทางเรขาคณิตรวมถึงรูปร่าง ขนาด และความขรุขระของพื้นผิวของช่อง มีอิทธิพลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนและแรงดันตกคร่อม การบรรลุความสมดุลที่เหมาะสมที่สุดระหว่างการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนและเรียงเสียดทานในการไหลที่จัดการได้ถือเป็นความท้าทายทางวิศวกรรมที่ซับซ้อนซึ่งจำเป็นต้องมีความเข้าใจที่ครอบคลุมว่าการกำหนดค่าทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างไร

จากการศึกษาในอดีตแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางเรขาคณิตของช่องทางการไหลมีผลอย่างมากกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในไมโครแชนเนล การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในไมโครแชนเนลจากการเปรียบเทียบรูปร่าง ,แอมพลิจูด และความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปศึกษาและพัฒนาให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของไมโครแชนเนล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเชิงตัวเลขถึงผลกระทบของรูปทรงของไมโครเซนเนลรูปแบบต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และ ความดันตกที่เกิดขึ้นสำหรับการไหลแบบสถานะเดียว โดยใช้น้ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และ ความดันตกเมื่อแอมพลิจูดของไมโครเซนเนลเท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mm และเมื่อความยาวคลื่นเท่ากับ 3, 4, 6 และ 8 mm

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 ไมโครเซนเนลแบบคลื่นรูปวงรี มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด และ ความดันตกน้อยที่สุด

1.3.2 แอมพลิจูดยิ่งมากทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนยิ่งดี

1.3.3 ความยาวคลื่นยิ่งสั้นทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนยิ่งดี

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้ใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยเทคนิค Computational fluid dynamics (CFD) โดยจำลองการไหล การถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อม ในรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆ ของไมโครเซนเนล

1.4.2 กำหนดไมโครเซนเนลทำจากทองแดง หน้าตัดกว้าง 0.6 mm สูง 0.2 mm

1.4.3 การไหลสถานะเดียว

1.4.4 การไหลแบบราบเรียบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ 160 ,300 ,500 ,700 และ 900

1.4.5 รูปร่างของไมโครเซนเนล ได้แก่ แบบท่ตรง แบบคลื่นรูปไซน์ แบบคลื่นรูปวงรี หน้าตัดของไมโครเซนเนลได้แก่ หน้าตัดสี่เหลี่ยม หน้าตัดวงกลม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของรูปร่างของท่อไมโครเซนเนลต่อการถ่ายเทความร้อน

1.5.2 กำหนดวัตถุประสงค์และสมมติฐานงานวิจัย รวมทั้งกำหนดขอบเขตงานวิจัย

1.5.3 ศึกษาโปรแกรมการจำลองเชิงตัวเลข ANSYS

1.5.4 จำลองเชิงตัวเลขของไมโครเซนเนลในรูปร่าง ,แอมพลิจูด และความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยโปรแกรม ANSYS

1.5.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความดันตกของรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆ โดยใช้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิก

1.5.6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.6.1 ได้เรียนรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม ANSYS

1.6.2 ทำให้ทราบถึงรูปร่างที่ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และ ความดันตกคร่อมของไมโครเซนเนลดีที่สุด

1.6.3 ทำให้ทราบว่าแอมพลิจูดและความยาวคลื่นไหนของไมโครเซนเนล ที่ทำให้มีการถ่ายเทความร้อน และ ความดันตกคร่อมดีที่สุด

## บทที่ 2

### งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 การไหลภายในท่อ

##### 2.1.1.1 ความแตกต่างระหว่างการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

ในไมโครแชนเนล การไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนมีลักษณะที่ต่างกัน และการแยกความแตกต่างระหว่างการไหลทั้งสองแบบให้ได้เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบไมโครแชนเนล และการทำความเข้าใจพฤติกรรมของของไหลในไมโครแชนเนล การไหลแบบราบเรียบมีลักษณะเฉพาะคือการเคลื่อนที่ของของไหลที่เป็นระเบียบโดยอนุภาคของไหลเคลื่อนที่เป็นชั้นและขนานกันและมีการคลุกเคล้าและการเคลื่อนที่ปั่นป่วนน้อยมาก การไหลแบบปั่นป่วนมีลักษณะเป็นการเคลื่อนที่ของของไหลที่กระจัดกระจายและไม่สม่ำเสมอโดยเกี่ยวข้องกับการคลุกเคล้าของอนุภาคของไหลในทุกทิศทางและการมีอยู่ของกระแสน้ำวนแบบต่างๆ (Eddies, swirls and vortices) เลขเรย์โนลด์เป็นตัวแปรไร้มิติที่ช่วยบอกได้ว่าการไหลที่กำลังพิจารณาเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนและคำนวณโดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$Re = \frac{\rho \cdot U_m \cdot D_h}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ	$\rho$	คือความหนาแน่นของของไหล
	$U_m$	คือความเร็วเฉลี่ยของของไหล
	$D_h$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของไมโครแชนเนล
	$\mu$	คือความหนืดไดนามิกของของเหลว

สมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของไมโครแชนเนลเป็นดังต่อไปนี้

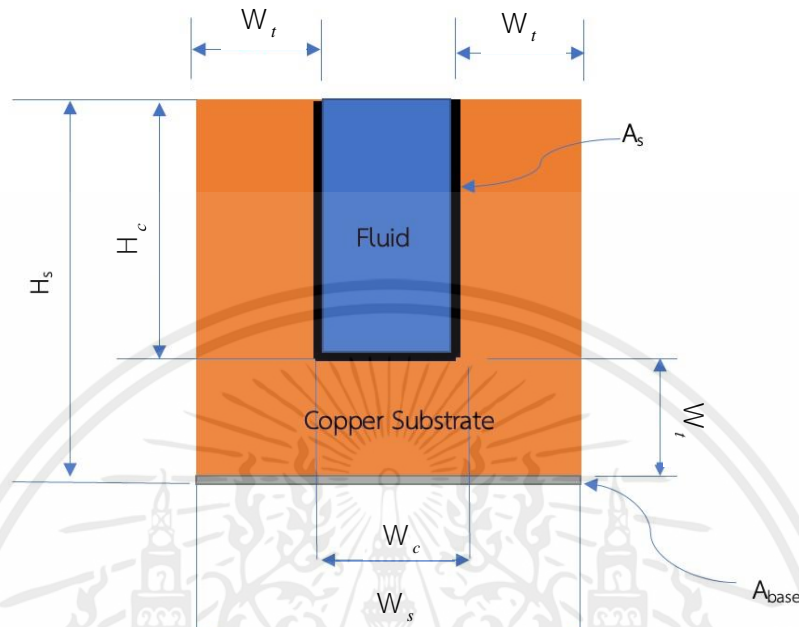
$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{2W_c H_c}{W_c + H_c} \quad (2)$$

เมื่อ	$A_c$	คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ
	$P$	คือเส้นรอบรูปของพื้นที่เปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W_c$  คือความกว้างของช่องหน้าต่างตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$H_c$  คือความสูงของช่องหน้าต่างตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 2.1 แสดงตัวแปรขนาดของท่อและพื้นที่ผิวต่างๆ

ถ้าเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,000 โดยทั่วไปการไหลในไมโครแชนเนลจะเป็นแบบราบเรียบ และถ้าเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4,000 การไหลในไมโครแชนเนลมักจะปั่นป่วน ในส่วนโปรไฟล์ความเร็ว การไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนลมีโปรไฟล์ความเร็วแบบพาราโบลาโดยมีความเร็วสูงสุดที่ ศูนย์กลางของช่องทางและความเร็วลดลงเมื่อเข้าหาผนัง การไหลแบบปั่นป่วนในไมโครแชนเนลมี โปรไฟล์ความเร็วที่แบนกว่าและสม่ำเสมอกว่าแบบราบเรียบ ในส่วนการผสมคลุกเคล้าในของไหล การไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนลให้การคลุกเคล้าน้อยซึ่งดีต่อการประยุกต์ใช้ที่ต้องการควบคุม การคลุกเคล้า การไหลแบบปั่นป่วนให้การคลุกเคล้าของของไหลอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งเป็น ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ในส่วนการถ่ายโอนความร้อน การไหลแบบ ราบเรียบให้การถ่ายเทความร้อนที่คาดการณ์และควบคุมได้มากขึ้น ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ ต้องการการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำ การไหลแบบปั่นป่วนช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเนื่องจาก การคลุกเคล้าของของไหลเพิ่มขึ้น มักใช้เมื่อต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็ว ในส่วนความ ดันตกการไหลแบบราบเรียบจะมีความดันตกในไมโครแชนเนลที่ต่ำกว่า เนื่องจากแรงเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างของไหลและผนังช่องลดลง การไหลแบบปั่นป่วนส่งผลให้ความดันตกสูงขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานและการผสมที่เพิ่มขึ้น

### 2.1.1.2 การเปลี่ยนผ่านจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน

การเปลี่ยนผ่านจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วนเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญและน่าสนใจในพลศาสตร์ของไหล มันเกิดขึ้นภายในช่วงเฉพาของเลขเรย์โนลด์ และสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการไหล ในช่วงเลขเรย์โนลด์  $2300 < Re < 4000$  การไหลจะแสดงลักษณะของการไหลทั้งแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน กล่าวคือเป็นสภาวะเปลี่ยนผ่านที่การไหลไม่เป็นทั้งราบเรียบเต็มที่หรือปั่นป่วนเต็มที่

### 2.1.1.3 การไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนล

ในส่วนลักษณะของการไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนล การไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนลมีลักษณะเป็นการไหลที่ราบเรียบและเป็นระเบียบ อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ในชั้นขนาน และมีการคลุกเคล้าและการเคลื่อนที่ปั่นป่วนน้อยมาก โดยทั่วไปแล้วไมโครแชนเนลจะทำงานที่เลขเรย์โนลด์ต่ำซึ่งเป็นลักษณะของการไหลแบบราบเรียบ ความเร็วต่ำและขนาดลักษณะเฉพาที่เล็กในไมโครแชนเนลส่งผลให้เลขเรย์โนลด์ต่ำกว่าขีดแบ่งการเปลี่ยนแปลงผ่านอย่างมาก การไหลแบบราบเรียบส่งผลให้เกิดโปรไฟล์ความเร็วที่คาดการณ์ได้เพราะเป็นการกระจายความเร็วแบบพาราโบลา โดยความเร็วสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ศูนย์กลางของไมโครแชนเนลและค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ถึงผนังของไมโครแชนเนล

## 2.1.2 กลไกการถ่ายเทความร้อน

รูปแบบการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันในตัวระบายความร้อนแบบไมโครแชนเนล โดยทั่วไปประกอบด้วยการนำผ่านผนังที่บ การพาความร้อนภายในของไหลที่ไหลผ่านไมโครแชนเนล และการแผ่รังสี แต่การถ่ายเทความร้อนด้วยรังสีมีนัยสำคัญน้อยกว่ารูปแบบอื่นในไมโครแชนเนลและอาจพิจารณาในกรณีที่อุณหภูมิสูง

### 2.1.2.1 การนำความร้อนภายในผนังของไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งเป็นของแข็ง

นิยามของการนำความร้อนคือกระบวนการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุอันเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลหรืออะตอมโดยตรงโดยสามารถเกิดขึ้นในของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แต่มีนัยสำคัญในของแข็งมากที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างอัดแน่น ความร้อนถูกถ่ายโอนผ่านวัสดุเมื่ออนุภาคพลังงานสูง (ซึ่งมีพลังงานจลน์สูงกว่า) ชนกับอนุภาคพลังงานต่ำ (ซึ่งมีพลังงานจลน์

ต่ำกว่า) กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ระบุว่าการถ่ายเทความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการไล่ระดับอุณหภูมิและการนำความร้อนของวัสดุดังต่อไปนี้

$$Q = -k_s A_{\text{base}} \frac{\Delta T}{W_t} \quad (3)$$

โดย  $k_s$  คือสภาพการนำความร้อนของผนังท่อทองแดง

$A_{\text{base}}$  คือพื้นที่ฐานของผนังท่อทองแดง

$W_t$  คือความหนาของผนังท่อทองแดง

$\Delta T$  คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนไประหว่างพื้นผิวที่ฐานกับพื้นผิวรอยต่อซี่สเตรต-ของไหล

ทองแดงมักถูกใช้ในแผงระบายความร้อนแบบไมโครแชนเนลเนื่องจากนำความร้อนได้ดี ความร้อนที่เกิดจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เช่นไมโครโพรเซสเซอร์จะถูกส่งผ่านผนังทึบของไมโครแชนเนล ดังนั้นการนำความร้อนที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการรับประกันว่าความร้อนจะถูกถ่ายโอนผ่านโครงสร้างของแข็งแล้วไปยังของเหลวหล่อเย็นต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อนำความร้อนออกจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

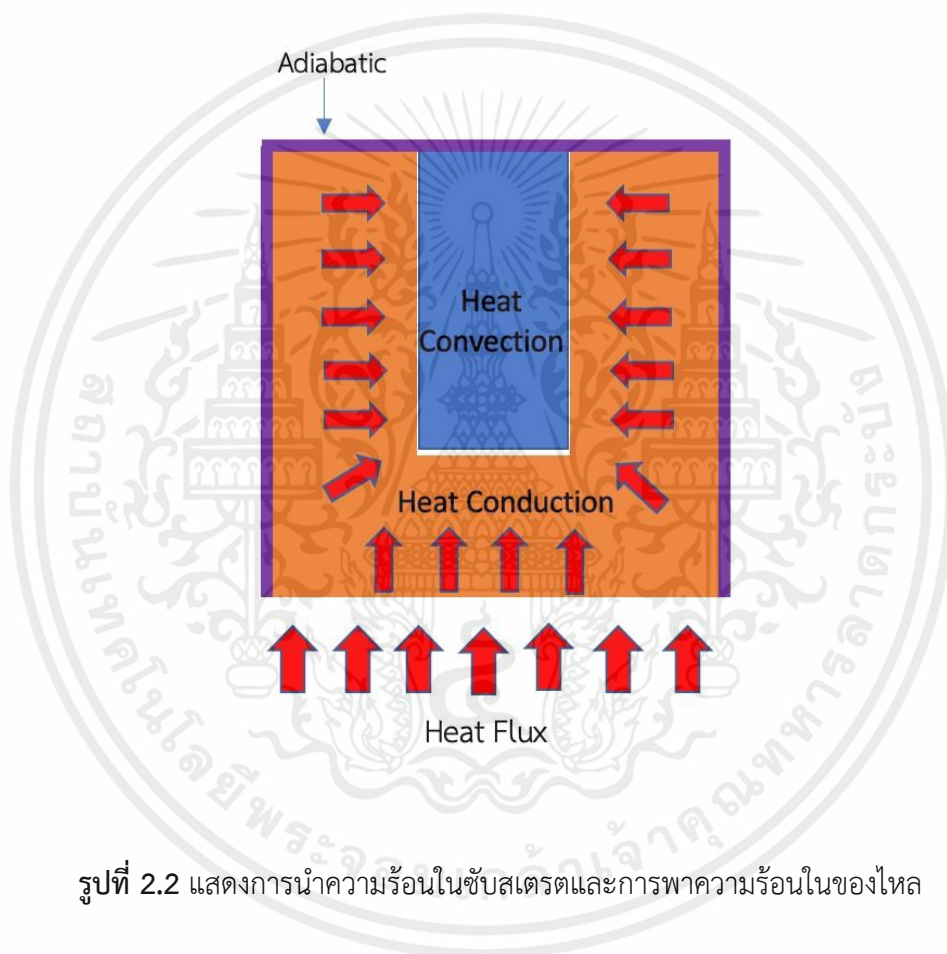
### 2.1.2.2 การพาความร้อนภายในของเหลวหล่อเย็นที่ไหลผ่านไมโครโพรเซสเซอร์

การพาความร้อนคือกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งและของไหล (ของเหลวหรือก๊าซ) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของก้อนของไหลการพาความร้อนนี้เป็นแบบบังคับเพราะเกิดจากวิธีภายนอกคือปั๊ม ความร้อนจะถูกถ่ายโอนผ่านการเคลื่อนที่ของอนุภาคของเหลวซึ่งนำพลังงานความร้อนออกไปจากพื้นผิวแข็ง กฎการทำความเย็นของนิวตันเกี่ยวข้องกับอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ( $h$ ) พื้นที่ผิวที่รอยต่อระหว่างซี่สเตรตกับของไหล ( $A_s$ ) และความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) ระหว่างพื้นผิวของแข็งและของไหล โดย  $T_m$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยเลขคณิตของ  $T_{in}$  และ  $T_{out}$  ของของไหลดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = hA_s \Delta T = hA_s (T_{A_s} - T_m) \quad (4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ( $h$ ) แสดงถึงความสามารถของของเหลวในการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของแข็ง ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ รวมถึงคุณสมบัติของของไหล สภาวะการไหล และรูปทรงเรขาคณิตของท่อ ความร้อนที่ถูกส่งผ่านผนังทึบของไมโครแชนเนลต่อไปยังของเหลวหล่อเย็นผ่านการพาความร้อน



รูปที่ 2.2 แสดงการนำความร้อนในชั้นสเตรตและการพาความร้อนในของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 พลศาสตร์ของไหลในไมโครแชนเนล

#### 2.1.3.1 การก่อตัวของชั้นขอบเขตความเร็วและอุณหภูมิ

การก่อตัวของชั้นขอบเขตความเร็วในไมโครแชนเนลมีสาเหตุมาจากสภาวะไม่สิ้นเปลืองที่ขอบเขตของแข็ง ทำให้เกิดการชะลอตัวของความเร็วของชั้นของไหล บริเวณของการไหลซึ่งได้รับผลกระทบของแรงเฉือนซึ่งเกิดจากความหนืดของของไหลเรียกว่าชั้นขอบเขตความเร็ว บริเวณตั้งแต่ทางเข้าท่อจนถึงจุดที่โปรไฟล์ความเร็วได้รับการพัฒนาอย่างเต็มที่เรียกว่าบริเวณทางเข้าของอุทกพลศาสตร์ และความยาวของบริเวณนี้เรียกว่าความยาวทางเข้าของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic entry length,  $L_h$ ) เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$L_{h, \text{ laminar}} = 0.05 \text{ Re } D_h \quad (5)$$

บริเวณการไหลที่ชั้นขอบเขตความร้อนพัฒนาขึ้นเนื่องจากการพาความร้อนในท่อไปถึงศูนย์กลางของท่อเรียกว่าบริเวณทางเข้าความร้อน และความยาวของบริเวณนี้เรียกว่าความยาวทางเข้าทางความร้อน (Thermal entry length,  $L_t$ ) เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$L_{t, \text{ laminar}} = 0.05 \text{ Re Pr } D_h \quad (6)$$

เมื่อ  $\text{Pr}$  คือ เลขพรันด์เทิล (Prandtl number) โดย

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_{p_f}}{k_f} \quad (7)$$

เมื่อ  $\nu$  คือความหนืดจลน์ของของไหล (Kinematic viscosity)

$\alpha$  คือการแพร่กระจายความร้อน (Thermal diffusivity)

$k_f$  คือสภาพการนำความร้อนของของไหล

$c_{p_f}$  คือความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่

#### 2.1.3.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการไหลในไมโครแชนเนล

ปัจจัยดังกล่าวประกอบไปด้วยความหนืดซึ่งเป็นตัววัดความต้านทานต่อการไหลของของไหลและส่งผลต่อการพัฒนาของชั้นขอบเขต ความหนาแน่นซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสัมพันธ์กับการไหลที่ขับเคลื่อนด้วยแรงลอยตัว และโปรไฟล์ความเร็วซึ่งโดยทั่วไปโปรไฟล์ความเร็วจะเป็นพาราโบลาสำหรับการไหลแบบราบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.4 เลขนัสเซลต์ (Nusselt number) และความดันตก (Pressure drop)

### 2.1.4.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเลขนัสเซลต์ในฐานะค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เลขนัสเซลต์เป็นอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนต่อการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนที่พื้นผิวระหว่างของแข็งและของเหลว เลขนัสเซลต์เป็นตัววัดว่าการพาความร้อนมีประสิทธิภาพเพียงใดในการถ่ายพาความร้อนเมื่อเทียบกับการนำความร้อน สมการเลขนัสเซลต์เฉพาะที่เป็นดังต่อไปนี้

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k_f} \quad (8)$$

เมื่อ  $D_h$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของไมโครแชนเนล

$h_x$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนเฉพาะที่ โดย

$$h_x = \frac{q_w A_{base}}{(T_{w_x} - T_{f_x}) A_s} \quad (9)$$

เมื่อ  $q_w$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่ผนังด้านล่างของซิปสเตอร์ทองแดง

$A_{base}$  คือพื้นที่ฐานของซิปสเตอร์ทองแดง

$A_s$  คือพื้นที่ผิวทั้งหมดของผนังด้านล่างและผนังด้านข้างที่ติดกับไมโครแชนเนล

$T_{f_x}$  คืออุณหภูมิของของไหลเฉลี่ยที่ระนาบที่ตั้งฉากกับการไหลซึ่งหาจากสมการต่อไปนี้

$$T_{f_x} = \frac{\int uT dA_c}{\int u dA_c} \quad (10)$$

$T_{w_x}$  คืออุณหภูมิผนังเฉลี่ยที่ระนาบเดียวกัน ซึ่งหาจากสมการต่อไปนี้

$$T_{w_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{w,i} \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $N$  คือจำนวนโน้ดที่อยู่รอบนอกของหน้าตัด  
 $T_{w,i}$  คืออุณหภูมิผนังที่โน้ด  $i$

เลขนัสเซิลต์เฉลี่ยสำหรับทั้งไมโครแชนเนลมีสมการดังต่อไปนี้

$$Nu_{avg} = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{A_s(T_w - T_m)} \left( \frac{D_h}{k} \right) \quad (12)$$

เมื่อ  $T_{out}$  คืออุณหภูมิของเหลวเฉลี่ยที่ระนาบทางออกของไมโครแชนเนล  
 $T_w$  คืออุณหภูมิผนังเฉลี่ยตามความยาว  
 $T_{in}$  คืออุณหภูมิของเหลวเฉลี่ยที่ระนาบทางเข้าของไมโครแชนเนล  
 $T_m$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยเลขคณิตของ  $T_{in}$  และ  $T_{out}$   
 $\dot{m}$  คืออัตราการไหลของมวล

#### 2.1.4.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับของความดันตกของการไหลในไมโครแชนเนล

ความดันตกคร่อม ( $\Delta p$ ) คือการลดลงของความดันของเหลวเมื่อของเหลวไหลผ่านไมโครแชนเนล ความดันตกคร่อมเป็นผลมาจากความต้านทานที่ของเหลวเผชิญเนื่องจากผลกระทบจากความหนืดและรูปทรงของไมโครแชนเนล ความดันตกคร่อมเนื่องจากแรงเสียดทานเป็นไปตามสมการ Darcy-Weisbach ต่อไปนี้

$$\Delta p = f_{avg} \frac{L}{D_h} \frac{1}{2} \rho U_m^2 \quad (13)$$

เมื่อ  $L$  คือความยาวไมโครแชนเนล  
 $f_{avg}$  คือแฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ย

แฟกเตอร์ความเสียดทานเฉพาะที่หาจากสมการต่อไปนี้

$$f_x = \frac{8\tau_{w,x}}{\rho U_m^2} \quad (14)$$

เมื่อ  $\tau_{w,x}$  คือความเค้นเฉือนที่ผนังเฉลี่ยที่ตำแหน่ง  $x$  ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\tau_{w,x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{w,i} \quad (15)$$

เมื่อ  $\tau_{w,i}$  คือความเค้นเฉือนที่ผนังที่โหนด  $i$

#### 2.1.4.3 ความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลต์และแฟกเตอร์ความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์

การเปลี่ยนแปลงของเลขเรย์โนลด์สามารถส่งผลกระทบต่อเลขนัสเซลต์แล้วทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน รูปแบบการไหลซึ่งแยกด้วยเลขเรย์โนลด์มีอิทธิพลต่อเลขนัสเซลต์ เช่นในการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนมีสหสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์ และเลขเรย์โนลด์ ที่ต่างกันชัดเจน สหสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องหรือสมการเอมพิริคัลที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์ และเลขเรย์โนลด์ สำหรับไมโครแชนแนล แบบเส้นตรงที่มีการไหลแบบราบเรียบในช่วงกำลังพัฒนาทางความร้อนที่ในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเงื่อนไขทางความร้อนเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผนังคงที่ ยกตัวอย่างเช่น สมการ Shah and London [12] ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Nu = \begin{cases} 1.953 \left( \text{Re Pr } \frac{D}{L} \right)^{1/3} & \left( \text{Re Pr } \frac{D}{L} \right) \geq 33.3 \\ 4.364 + 0.0722 \text{Re Pr } \frac{D}{L} & \left( \text{Re Pr } \frac{D}{L} \right) < 33.3 \end{cases} \quad (16)$$

หรือสมการ Stephan [13] ในช่วงกำลังพัฒนาไปพร้อมกัน ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Nu = 4.364 + \frac{0.086(\text{Re Pr } D/L)^{1.33}}{1 + 0.1\text{Pr}(\text{Re } D/L)^{0.83}} \quad (17)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงกำลังพัฒนาทางความร้อนที่ในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเงื่อนไขทางความร้อนเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผนังคงที่ ยกตัวอย่างเช่น สมการ Dittus-Boelter [14] ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu_{Dh} = 0.023 Re_{Dh}^{0.8} Pr^{0.4} \quad (18)$$

ในไมโครแชนแนลแบบเส้นตรง ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์ความเสียดทาน และเลขเรย์โนลด์ ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล ซึ่งมักถูกจัดประเภทเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน ในไมโครแชนแนลสำหรับการไหลแบบราบเรียบซึ่งมีคุณลักษณะเป็นเลขเรย์โนลด์ ต่ำกว่า 2300 โดยสามารถใช้สมการ Hagen-Poiseuille เพื่อคำนวณค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน จากสมการต่อไปนี้

$$f = \frac{62.2}{Re} \quad (19)$$

ในระบบการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งมีลักษณะเฉพาะคือเลขเรย์โนลด์ ที่สูงกว่า 2300 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์ความเสียดทาน และเลขเรย์โนลด์ จะซับซ้อนมากขึ้น ในไมโครแชนแนล สมการ Colebrook มักใช้ในการหาค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน ซึ่งจำเป็นต้องใช้วิธีแบบวนซ้ำในการแก้หาผลเฉลยเนื่องจากรูปแบบของสมการเป็นแบบโดยนัย ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (20)$$

อย่างไรก็ตาม ในไมโครแชนแนลการเปลี่ยนไปสู่การไหลแบบปั่นป่วนอาจเกิดขึ้นที่ตัวเลขเรย์โนลด์ ที่ต่ำกว่า มาโครแชนแนล เมื่อความขรุขระสัมพัทธ์ ( $\varepsilon/D$ ) มีค่ามากกว่า 0.01 มิฉะนั้น เลขเรย์โนลด์วิกฤตยังคงใช้เป็น 2300 ได้

อีกทั้ง สหสัมพันธ์ Shah and London [12] อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์ความเสียดทาน และเลขเรย์โนลด์สำหรับการไหลแบบราบเรียบแบบกำลังพัฒนาหรือพัฒนาเต็มที่ผ่านไมโครแชนแนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังต่อไปนี้

$$f = \frac{\left[ \left\{ \frac{3.2}{(x^+)^{0.57}} \right\}^2 + k^2 \right]^{1/2}}{Re} \quad (21)$$

เมื่อ  $k$  หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$k = 96(1 - 1.3553/\alpha + 1.9467/\alpha^2 - 1.7012/\alpha^3 + 0.9564/\alpha^4 - 0.2537/\alpha^5) \quad (22)$$

เมื่อ  $a$  (aspect ratio) คือ อัตราส่วนภาพซึ่งเท่ากับ  $\frac{H_c}{W_c}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความยาวทางเข้าหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$x^+ = L / (D_h \cdot \text{Re}) \quad (23)$$

## 2.1.5 เรขาคณิตไมโครแชนเนลแบบคลื่น

### 2.1.5.1 พื้นฐานทางทฤษฎีสำหรับการใช้รูปทรงแบบคลื่น

ของไหลที่ไหลผ่านทั้งไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปไซน์และคลื่นรูปวงรีต่างประสพกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในทางโค้ง ทำให้เกิดการไหลทุติยภูมิหรือกระแสแนวทุติยภูมิก่อตัวในระนาบแนวขวาง เรียกว่า Dean Vortices การไหลทุติยภูมิเหล่านี้ช่วยเพิ่มการผสมของของไหลและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตามแฟคเตอร์ความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นเช่นกันเนื่องจากการไต่ระดับความเร็วที่ผนังเพิ่มขึ้น ความแรงของกระแสแนวทุติยภูมิแสดงเป็นตัวเลขไร้มิติที่เรียกว่าเลขดีน (Dean number, De) ซึ่งได้ถูกนิยามไว้ดังต่อไปนี้

$$\text{De} = \text{Re} \sqrt{\frac{D_h}{2R_c}} \quad (24)$$

เมื่อ  $R_c$  คือรัศมีความโค้งของตำแหน่งที่กำหนด ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

$$R_c = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{\left| \frac{d^2y}{dx^2} \right|} \quad (25)$$

เมื่อ  $x$  คือระยะตามแนวแกน  $x$

$y$  คือระยะตามแนวแกน  $y$

จากที่กล่าวมาทำให้ไมโครแชนเนลแบบคลื่นมีการกระจายความร้อนจากซึบสเตรตได้มากกว่าไมโครแชนเนลแบบตรง อย่างไรก็ตามจะพบความดันตกจากแรงเสียดทานที่สูงขึ้นในไมโครแชนเนล ส่งผลให้ต้องใช้กำลังในการสูบมาก ดังนั้นการออกแบบไมโครแชนเนลที่เหมาะสมนั้นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิก (Thermohydraulic performance parameters,  $\eta$ ) ที่เสนอโดย Webb และ Eckert [1] ให้มีค่ามากกว่าหนึ่ง ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{Nu / Nu_0}{(f / f_0)^{\frac{1}{3}}} \quad (26)$$

เมื่อ	Nu	คือเลขนัสเซิลต์สำหรับไมโครแชนเนลที่ถูกเสนอขึ้นมาใหม่
	f	คือแฟคเตอร์ความเสียดทานสำหรับไมโครแชนเนลที่ถูกเสนอขึ้นมาใหม่
	Nu <sub>0</sub>	คือเลขนัสเซิลต์สำหรับไมโครแชนเนลที่ถูกอ้างอิง เช่นเลขนัสเซิลต์ของไมโครแชนเนลแบบตรง
	f <sub>0</sub>	คือแฟคเตอร์เสียดทานสำหรับไมโครแชนเนลที่ถูกอ้างอิง เช่นแฟคเตอร์ความเสียดทานของไมโครแชนเนลแบบตรง

ไมโครแชนเนลแบบคลื่นมีการใช้งานมาเป็นเวลานานเนื่องจากประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิกที่เหนือกว่าแบบท่อตรง นอกจากนี้ความเข้มของการไหลทุติยภูมิ (Secondary flow intensity, Se) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่คล้ายกับเลขเรย์โนลด์มักถูกพล็อตไปพร้อมกับเลขนัสเซิลต์ และแฟคเตอร์ความเสียดทาน เพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่น่าสนใจ A. Sharma and Mohd.K. Khan [7] เลขเรย์โนลด์แสดงถึงความแรงของการไหลปฐมภูมิ ในขณะที่ความเข้มของการไหลทุติยภูมิแสดงถึงความแรงของการไหลทุติยภูมิ Song and Wang [2] ได้นิยามความเข้มของการไหลทุติยภูมิ

$$Se_x = \frac{\rho d (J_x D_h)}{\mu} \quad (27)$$

เมื่อ  $J_x$  คือค่าเฉลี่ยของความหมุนวนสัมบูรณ์ที่หน้าตัดที่กำหนดซึ่งจะไปตามสมการต่อไปนี้

$$J_x = \frac{\int |\nabla \times U| dA}{\int dA} \quad (28)$$

อัตราส่วน  $De/Re$  เป็นฟังก์ชันของรัศมีความโค้ง ดังแสดงในสมการ (24) นอกจากนี้ยังถูกพล็อตร่วมกับเลขนัสเซิลต์ ,แฟคเตอร์ความเสียดทาน และพารามิเตอร์ความเข้มของการไหลทุติยภูมิ เพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของรัศมีความโค้งที่มีต่อการแปรผันของเลขนัสเซิลต์ , แฟคเตอร์ความเสียดทาน และพารามิเตอร์ความเข้มของการไหลทุติยภูมิ กล่าวคือเมื่อของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลเข้าส่วนโค้ง เลขนัสเซลล์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการผสมที่เกิดจากการก่อตัวของกระแสน้ำวนทุติยภูมิในหน้าตัดของไมโครเซนเนล แพคเตอร์ความเสียหายเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนของผนังเนื่องจากการไล่ระดับความเร็วโดยรวมที่เพิ่มขึ้นที่ผนังภายใต้อิทธิพลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

### 2.1.5.2 รูปร่างของท่อไมโครเซนเนลแบบคลื่นรูปไซน์ และแบบคลื่นรูปวงรีใน

#### ไมโครเซนเนล

โพรไฟล์ของไมโครเซนเนลคลื่นรูปไซน์และคลื่นรูปวงรีถูกสร้างขึ้นโดยใช้สมการต่อไปนี้

โพรไฟล์รูปไซน์:

$$y = A \sin(2\pi x / \lambda) \quad (29)$$

โพรไฟล์รูปวงรี:

$$\frac{(x - a)^2}{(\lambda/4)^2} + \frac{y^2}{A^2} = 1 \quad (30)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดของคลื่น

$\lambda$  คือความยาวคลื่นของไมโครเซนเนลคลื่นรูปไซน์และคลื่นรูปวงรี

(a,0) คือจุดศูนย์กลางของไมโครเซนเนลคลื่นรูปวงรี

x คือระยะตามแนวแกน x

y คือระยะตามแนวแกน y

## 2.1.6 การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขและการจำลอง

### 2.1.6.1 พื้นฐานของการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขในพลศาสตร์ของไหล

ในส่วนวิธีการเชิงตัวเลขในพลศาสตร์ของไหลวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้กันทั่วไปในพลศาสตร์ของไหลคือ Finite Difference Method (FDM), Finite Element Method (FEM) และ Finite Volume Method (FVM) วิธีการเชิงตัวเลขเหล่านี้เป็นเครื่องมือสำคัญในการจำลองการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน การเลือกวิธีการขึ้นอยู่กับความซับซ้อน รูปทรงเรขาคณิต และข้อกำหนดเฉพาะของปัญหา อีกทั้งแต่ละวิธีก็มีจุดแข็งและข้อจำกัดของตัวเอง

ในส่วนสมการควบคุม สมการพื้นฐานในพลศาสตร์ของไหลคือสมการความต่อเนื่อง, สมการ Navier-Stokes และสมการพลังงาน สมการพื้นฐานเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของของไหลในการใช้งานที่หลากหลาย ด้วยการแก้สมการเหล่านี้สามารถเข้าใจและคาดการณ์ได้ว่าของเหลวเคลื่อนที่อย่างไร ความดันและความเร็วแปรผันอย่างไร และความร้อนถูกถ่ายเทในระบบของเหลวต่างๆอย่างไร สมการเหล่านี้เป็นรากฐานสำหรับการจำลอง Computational Fluid Dynamics (CFD) ซึ่งใช้ในการศึกษาและปรับพฤติกรรมของของไหลให้เหมาะสมในรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อนและการใช้งานในโลกแห่งความเป็นจริง

การทำให้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discretization) เชิงตัวเลขช่วยให้สามารถแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ซับซ้อนได้โดยการแยกปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆที่สามารถจัดการได้โดยจะแปลงโดเมนต่อเนื่องและสมการต่อเนื่องเป็นระบบที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งสามารถแก้ได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ กระบวนการนี้เป็นพื้นฐานของ CFD และเทคนิคการจำลองเชิงตัวเลขอื่นๆอีกมากมาย

การสร้างเมชจะทำการกำหนดกริดขึ้นบนแบบจำลอง ข้อควรพิจารณาในการสร้างเมชประกอบด้วย การปรับแต่งกริดและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ประเภทของเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดในการจำลองพลศาสตร์ของไหลอาจรวมถึงเงื่อนไขทางเข้าและทางออก สภาวะการไม่ลื่นไหลบนผนัง และเงื่อนไขสำหรับการถ่ายเทความร้อน พารามิเตอร์และคุณสมบัติทางกายภาพที่ต้องกำหนดในการจำลองเชิงตัวเลข ได้แก่ ความหนาแน่นของของเหลว ความหนืด และการนำความร้อน กระบวนการตรวจสอบและยืนยันช่วยให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำโดยแบบจำลองจะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองหรือผลเฉลยการวิเคราะห์

### 2.1.6.2 พื้นฐานทางทฤษฎีของสมการ Navier-Stokes สำหรับการจำลองการไหล

เพื่อที่จะแก้สมการ Navier-Stokes และสมการพลังงานเพื่อศึกษาผลกระทบของแอมพลิจูดของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของแผงระบายความร้อนแบบไมโครเซนแนล จึงได้มีการตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

- (1). ทั้งการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนอยู่ในสภาวะคงตัวและสามมิติ
  - (2). ของไหลอยู่ในสถานะเดียวไม่สามารถอัดตัวได้ และการไหลเป็นแบบราบเรียบ
  - (3). คุณสมบัติทางอุณหฟิสิกส์ของทั้งของไหลและวัสดุของแผงระบายความร้อนไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
  - (4). พื้นผิวทั้งหมดของแผ่นระบายความร้อนที่สัมผัสกับบริเวณโดยรอบจะถือว่าเป็นฉนวน ยกเว้นผิวด้านล่างของผนังด้านล่างของแผงระบายความร้อน ซึ่งมีการระบุสภาวะขอบเขตทางความร้อนคือ ฟลักซ์ความร้อนคงที่ซึ่งจำลองความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- สมการควบคุมสำหรับโดเมนของไหลและของแข็งของแผงระบายความร้อนแบบไมโครเซนแนล มีดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (31)$$

สมการโมเมนตัม

$$\rho_f (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (32)$$

สมการพลังงานสำหรับของแข็ง

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (33)$$

สมการพลังงานสำหรับของไหล

$$\rho_f c_p (\mathbf{U} \cdot \nabla) T = k_f \nabla^2 T \quad (34)$$

ในสมการต่างๆข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $U$  คือเวกเตอร์ความเร็ว

$p$  คือความดัน

$T$  คืออุณหภูมิ

$P_f$  คือความหนาแน่นของของเหลวหล่อเย็น

$k_s$  คือค่าการนำความร้อนของฉนวนที่เป็นของแข็ง

$k_f$  คือของเหลวหล่อเย็น

$c_{pf}$  คือความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่

$\mu$  คือความหนืดไดนามิกของของเหลว

คุณสมบัติทางอุณหฟิสิกส์ของน้ำถือว่าคงที่และแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของโดเมนของไหลและของแข็ง

โดเมน	สภาพนำความร้อน $k$ (W/m-k)	ความหนาแน่น $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	ความร้อนจำเพาะ $c_p$ (J/kg-K)	ความหนืดไดนามิก $\mu$ (Pa-s)
ของไหลหล่อเย็น (น้ำ)	0.6	998.2	4182	0.001003
ฉนวนของแข็ง (ทองแดง)	387.6	8978	381	-

ในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองสำหรับเลขเรย์โนลด์ที่แตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 160, 300, 500, 700 และ 900 เงื่อนไขขอบเขตของความเร็วที่ทางเข้าและความดันที่ทางออกนำไปใช้กับรูปร่างของไมโครแชนเนลแบบต่างๆ ผนังทุกด้านมีสถานะไม่ลื่นไถล จาก A. Sharma and Mohd.K. Khan [7] เลือกฟลักซ์ความร้อน 500 kW/m<sup>2</sup> ที่ด้านล่างของฉนวนทองแดงเพื่อหลีกเลี่ยงการกลายเป็นไอของน้ำที่เลขเรย์โนลด์ต่ำสุด  $Re = 160$  ในการไหลของของเหลวแบบสถานะเดียวผ่านไมโครแชนเนลขีดจำกัดบนของเลขเรย์โนลด์จะคงไว้ต่ำกว่า 900 ในขณะที่พื้นผิวที่ไหลเป็นแบบอะเดียแบติก ความต้านทานการสัมผัสที่รอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลวไม่ถูกนำมาพิจารณา เงื่อนไขขอบเขตที่ถูกใช้ในการแก้สมการควบคุมข้างต้นมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเข้า:

ความเร็วสม่ำเสมอ ( $u = U, v = w = 0$ )

อุณหภูมิสม่ำเสมอ ( $T_{in} = 295 \text{ K}$ )

ทางออก:

ความดันคงที่ที่ทางออก (1 atm)

รอยต่อระหว่างชั้นสเตรตกับของไหล:

ไม่มีการเลื่อนไหล ( $u = v = w = 0$ )

$$\text{คู่ควบ } (q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_f)$$

พื้นผิวด้านล่างของชั้นสเตรต:

ฟลักซ์ความร้อน ( $q_w = 500 \text{ kW / m}^2$ )

พื้นผิวที่เหลื่ออยู่:

$$\text{อะเดียแบติก } (q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = 0)$$

แบบจำลองสร้างโดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่ใช้ปริมาตรจำกัด ANSYS Fluent เวอร์ชัน 2023 สมการควบคุมถูกแก้โดยใช้ Steady Pressure-Based Solver วิธี Second-Order Upwind ใช้เพื่อให้สมการโมเมนตัมและสมการพลังงานเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง เทคนิค SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) ใช้สำหรับการเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็ว สมการนี้ใช้วิธี least-square cell-based method เพื่อให้พจน์การไล่ระดับความเร็ว อุณหภูมิ และความดันเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง หลักเกณฑ์การลู่เข้าที่พิจารณาสำหรับสมการความต่อเนื่องคือ  $1 \times 10^{-6}$  และสำหรับสมการพลังงานคือ  $1 \times 10^{-9}$  ข้อมูลที่ได้หลังการประมวลผลถูกใช้ในการคำนวณปริมาณที่สนใจ เช่น เลขนัสเซลต์เฉพาะที่และเฉลี่ย และค่าแฟคเตอร์แรงเสียดทานเฉพาะที่และเฉลี่ย เอนโทรปีที่ถูกสร้างขึ้น และพารามิเตอร์ประสิทธิภาพเทอร์โมไฮดรอลิกสำหรับแต่ละรูปทรงเรขาคณิตของไมโครแชนเนล โดยมีขั้นตอนโดยคร่าวๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณเชิงตัวเลขดำเนินการโดยการแก้สมการการอนุรักษ์ต่างๆที่ใช้ควบคู่กับเงื่อนไขขอบ (สมการ (34)– (37)) สมการของสถานะของแข็งและสถานะของไหลทุกเซลล์ถูกแก้พร้อมกันเป็นปัญหาคอนจูเกตโดเมนเดียว การทำสมการการควบคุมของบริเวณของไหลและของแข็งให้เป็นแบบไม่ต่อเนื่องทำได้โดยใช้วิธีปริมาตรจำกัด (FVM) ด้วย hybrid differencing scheme แบบจำลองเชิงตัวเลขได้รับการพัฒนาไปสู่โดเมนทางกายภาพ และเลขชี้เซลล์เฉพาะที่และเฉลี่ยและค่าแฟคเตอร์แรงเสียดทานเฉพาะที่และเฉลี่ยคำนวณจากการกระจายความเร็วและอุณหภูมิที่คำนวณได้ ตัวแปรการไหลถูกแก้โดยใช้อัลกอริทึม SIMPLE มาตรฐาน [14] ซึ่งคือกระบวนการแก้หาผลเฉลยแบบวนซ้ำโดยการคำนวณเริ่มต้นด้วยการคาดเดาค่าตัวแปรความดัน จากนั้นจึงแก้สมการโมเมนตัมเพื่อหาค่าประกอบของความเร็วก่อนความดันถูกอัปเดตค่าโดยใช้สมการความต่อเนื่อง แม้ว่าสมการความต่อเนื่องไม่มีความดันอยู่ในสมการ แต่ก็สามารถถูกแปลงเป็นสมการแก้ไขความดันได้อย่างง่ายดาย [15] การวนซ้ำจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งผลรวมของค่าเบี่ยงเบน (Residual) สำหรับการคำนวณเซลล์ทั้งหมดน้อยกว่าค่าที่กำหนด และส่วนประกอบความเร็วไม่เปลี่ยนจากการวนซ้ำ เนื่องจากการสมมติให้ค่าของคุณสมบัติทางอุณหฟิสิกส์ของของไหลคงที่และให้แรงลอยตัวสามารถละได้ตั้งนั้นสมการมวลและโมเมนตัมจึงไม่ควบคู่กับสมการพลังงาน ดังนั้นค่าตัวแปรอุณหภูมิจึงคำนวณโดยการแก้สมการพลังงานหลังจากผลเฉลยของค่าตัวแปรการไหลที่รู้แล้วถูกหาได้แล้วจากการแก้สมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง

จำนวนเซลล์รูปทรงหกเหลี่ยมที่เหมาะสมในโดเมนถูกเลือกจากจำนวนเซลล์ที่ทดสอบต่างๆจากการพิจารณาความเป็นอิสระของกริดจากผลเฉลย กล่าวคือเมื่อจำนวนเซลล์หนึ่งให้ค่าใกล้เคียงในระดับที่เป็นที่ยอมรับได้ ก็ไม่มีความจำเป็นต้องใช้จำนวนเซลล์ที่มากไปกว่านั้นด้วยเหตุผลของเวลาในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ แล้วจึงใช้จำนวนเซลล์นั้นคำนวณตลอดการคำนวณในการศึกษา

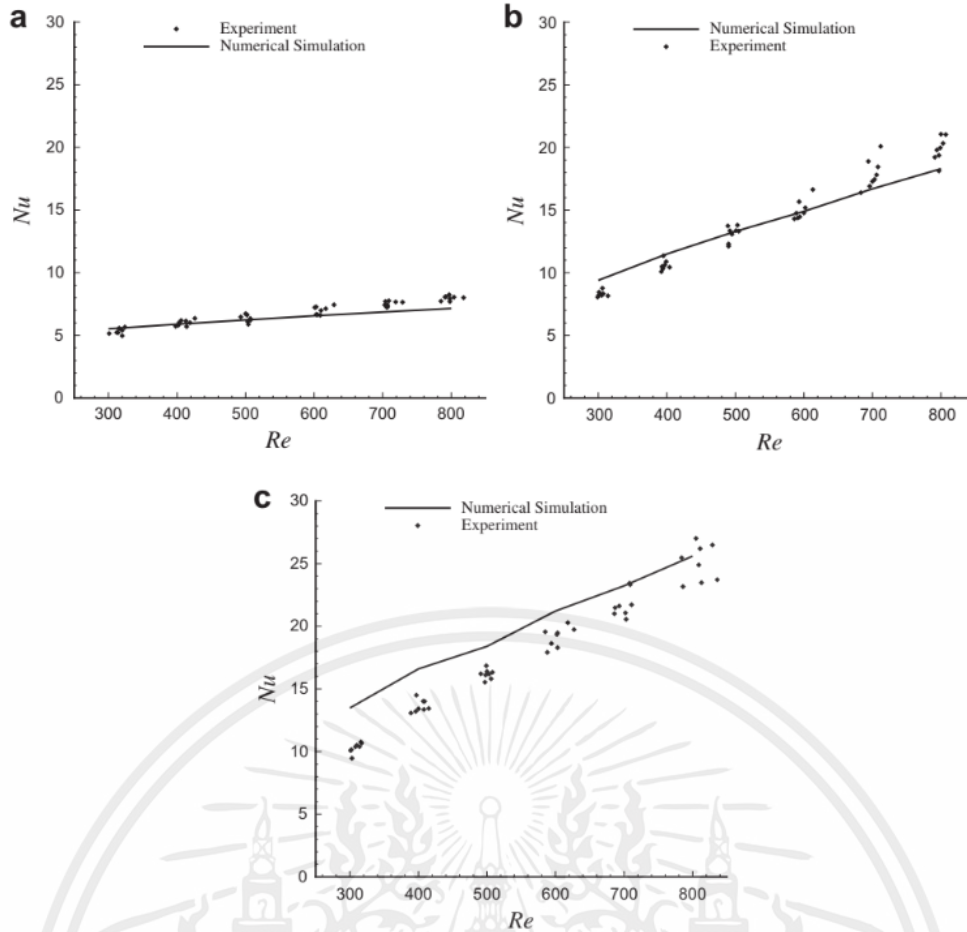
## 2.2 ทบทวนวรรณกรรม

แนวคิดของการถ่ายเทความร้อนของของไหลในช่องการไหลขนาดเล็กหรือไมโครแชนแนล นั้นได้ถูกเสนอขึ้นโดย Tuckerman and Pease [17] โดยเป็นการไหลแบบสถานะเดียวในท่อตรงขนาดเล็ก พบว่าการลดขนาดท่อให้เล็กลงจนถึงระดับไมโครนั้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

Harms [18] และ Harms และคณะ [19] ได้ทดลองการพาความร้อนแบบสถานะเดียวในไมโครแชนแนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีความลึกแตกต่างกัน โดยไมโครแชนแนลทำจากซิลิกอนหนา 2 mm และใช้น้ำกลั่นเป็นของไหล พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์ และความกว้างของท่อคงที่ ความดันตกที่เกิดขึ้นแปรผกผันกับความลึกของท่อ

Ambatipudi and Rahman [20] ทำการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาตัวแปรทางเรขาคณิต (ความลึกและความกว้างของช่อง) , จำนวนช่อง และอัตราการไหลของของไหลผ่านท่อไมโครแชนแนล พบว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามความเร็วของของไหลภายในท่อ ส่วนเลขนัสเซิลต์เฉพาะที่นั้นเพิ่มขึ้นตามความยาวของท่อ และได้ทำการสรุปว่าการเพิ่มจำนวนช่องของไมโครแชนแนลส่งผลให้เลขนัสเซิลต์ตามความยาวของท่อเพิ่มขึ้น

Sui และคณะ [3] พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและความดันตกในไมโครแชนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ กับแบบท่อตรงที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนแบบคอนจูเกตด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผนัง และมีอุณหภูมิผนังคงที่ ที่  $Re = 800$  โดยแอมพลิจูดของท่อคลื่นที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 138 และ 259  $\mu m$  ผลที่ได้พบว่าความดันตกของไมโครแชนแนลแบบคลื่นรูปไซน์เพิ่มขึ้น 41% และ 76% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของไมโครแชนแนลแบบคลื่นรูปไซน์เพิ่มขึ้น 149% และ 211% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับไมโครแชนแนลแบบท่อตรง จากผลการจำลองเชิงตัวเลขสรุปได้ว่าไมโครแชนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าไมโครแชนแนลแบบท่อตรงและยิ่งความยาวคลื่นสั้นลงยิ่งทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมากขึ้นรวมทั้งทำให้อุณหภูมิของชิปตามทิศทางการไหลลดลง



รูปที่ 2.3 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขนัสเซลต์ จากการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขกับเลขเรย์โนลด์ โดย A คือแอมพลิจูด = 0 ,B คือแอมพลิจูด = 138  $\mu\text{m}$  ,C คือแอมพลิจูด = 259  $\mu\text{m}$  [3] Sui และคณะ

Mohammed และคณะ [5] ทำการจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปไซน์ ที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อแบบคลื่นที่มีเลขเรย์โนลด์ เท่ากัน มีค่าสูงกว่าแบบท่อตรง เนื่องจากการที่ของไหลไหลผ่านท่อแบบคลื่นรูปไซน์ทำให้เกิดกระแสการหมุนวน ทำให้การผสมกันของของไหลดีขึ้น

Gong และคณะ [4] ทำการจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแชนเนลแบบคลื่น ที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และศึกษาการไหลของของเหลวที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ ( $10 \leq Re \leq 100$ ) ในการไหลแบบราบเรียบ พบว่าประสิทธิภาพโดยรวม(Overall Performance) ที่  $Re = 100$  สำหรับแอมพลิจูด 50 ,100 ,150 ,200  $\mu\text{m}$  เท่ากับ 1.23% ,6.49% ,21.47% และ 46.89% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.2 จึงสรุปได้ว่าที่เลขเรย์โนลด์ต่ำ เมื่อค่าแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวเลขประสิทธิภาพที่แอมพลิจูดต่างๆ [4] Gong และคณะ

$A$ ( $\mu\text{m}$ )	$Re$	$\Delta P_w / \Delta P_s$	$(Nu_w - Nu_s) / Nu_s$ (%)
50	10	1.01	0.45
	20	1.02	0.56
	50	1.02	0.97
	100	1.03	1.23
100	10	1.06	1.46
	20	1.07	2.04
	50	1.10	3.67
	100	1.14	6.49
150	10	1.14	3.02
	20	1.16	4.56
	50	1.23	8.37
	100	1.32	21.47
200	10	1.25	5.24
	20	1.28	8.47
	50	1.41	15.29
	100	1.58	46.89

Lin และคณะ [6] ทำการจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแชนเนลแบบคลื่น โดยเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดและความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ พบว่า เมื่อทำให้ท่อคลื่นมีความยาวคลื่นลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

Ankur และคณะ [7] ทำการจำลองเชิงตัวเลขของไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่นรูปไซน์ ที่แอมพลิจูดเท่ากับ 0.6 mm. และความยาวคลื่น 3 mm, 4 mm, 6 mm. และ 8 mm. พบว่าเลขนัสเซิลต์และแฟคเตอร์ความเสียหายเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นที่น้อยลง รวมทั้งพบว่าไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปวงรี มีประสิทธิภาพมากกว่าไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปไซน์ เกือบทุกกรณี โดยเลขนัสเซิลต์ เพิ่มขึ้น 4.5% 9.4% 13.7% และ 20.5% ค่าแฟคเตอร์ ความเสียหายเพิ่มขึ้น 4.1% 11.8% 17.1% และ 23.9% ตามลำดับ โดยมีเหตุผลหลักๆมาจาก รัศมีความโค้งที่ต่ำกว่า ค่า Dean number ที่มากกว่า และอัตราส่วนเลขเรย์โนลด์ของไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปวงรี เมื่อเปรียบเทียบกับ ไมโครแชนเนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่เงื่อนไขเหมือนกัน

Vinoth และคณะ [8] ทำการศึกษาไมโครแซนเนลที่มีหน้าตัดต่างๆ ได้แก่ แบบสี่เหลี่ยม วงกลม และคางหมู พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของไมโครแซนเนลหน้าตัดสี่เหลี่ยม คางหมูมากกว่าแบบสี่เหลี่ยม และวงกลม 3.133% และ 5.878% ตามลำดับบีเลขนัสเซลล์ มากกว่า 8.54% และ 26.4% ตามลำดับ รวมทั้งแบบสี่เหลี่ยมคางหมูยังมีค่าความดันตกมากกว่า แบบสี่เหลี่ยมและวงกลม 16.8% และ 24% เพราะการเพิ่มขึ้นของแฟคเตอร์ความเสียดทานใน หน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูระหว่างการไหล

การศึกษาบางส่วนที่อธิบายไว้ข้างต้นเป็นส่วนหนึ่งของการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับ ไมโครแซนเนล โดยมุ่งเน้นไปที่สมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครแซนเนลคลื่นรูปไซน์เป็นหลัก และมีการเปรียบเทียบสมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครแซนเนลคลื่นรูปวงรีกับไมโครแซนเนล คลื่นรูปไซน์โดยมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น ในส่วนการศึกษาในปริญญาานิพนธ์นี้เปรียบเทียบ สมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครแซนเนลคลื่นรูปวงรีกับไมโครแซนเนลคลื่นรูปไซน์สำหรับการ ไหลของน้ำแบบราบเรียบโดยมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของไมโครแซนเนลคลื่นรูปวงรี ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้คือศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ไมโครแซนเนลรูปคลื่นวงรีเป็นทางเลือกแทน ไมโครแซนเนลรูปคลื่นไซน์และเลือกแอมพลิจูดและความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในการ ถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 การเลือกขนาดเมชที่เหมาะสม (Mesh Independence)

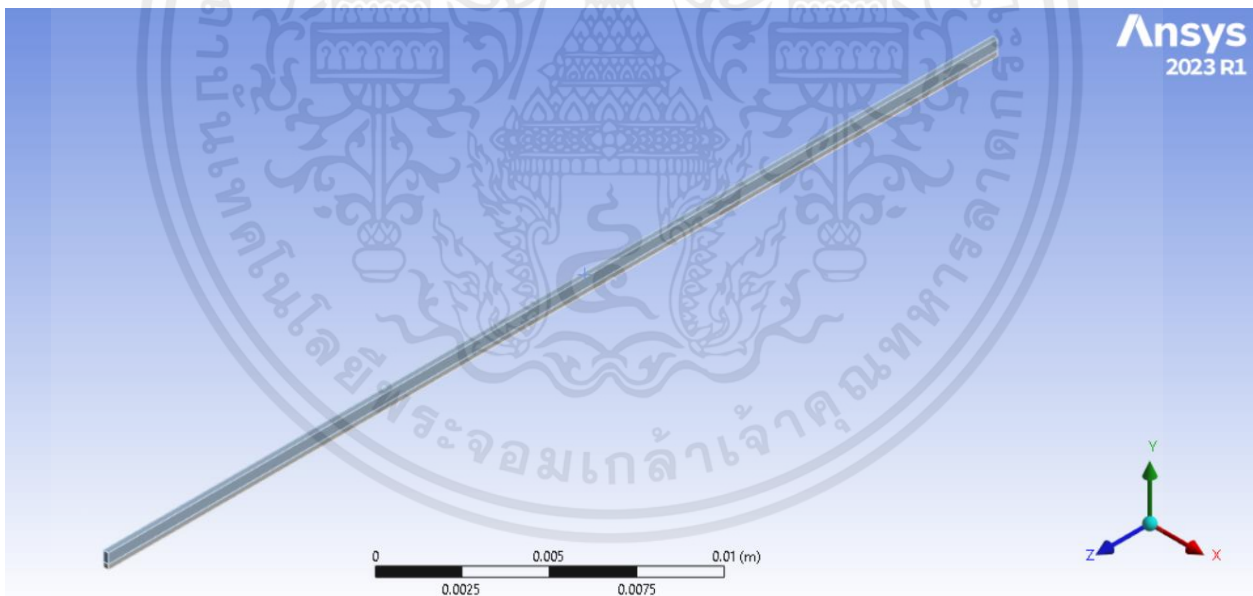
โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของรูปร่างของท่อไมโครเซนแนลต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม  $0.2 \times 0.4 \text{ mm}^2$  โดยใช้โปรแกรม Ansys Fluent ในการจำลองแบบจำลอง

##### 3.1.1 งานวิจัยที่ใช้ในการตรวจสอบผล

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข จะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากแบบจำลองของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7] ได้นำเสนอผลการถ่ายเทความร้อนและความดันลดในท่อตรง รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองของท่อตรงที่พิจารณา

##### 3.1.2 การแบ่งเมชที่ใช้ในการจำลอง (Meshing)

การหาจำนวนเมชที่เหมาะสมในการจำลองนั้นมีความสำคัญ โดยจะต้องหาจุดที่เหมาะสมระหว่างเวลาที่ใช้ในการจำลองและความแม่นยำของแบบจำลอง โดยงานวิจัยนี้แบ่งจำนวนเมชออกเป็น 270000, 320000 และ 420000 elements ในหัวข้อ Sizing Function เป็น Edge sizing กำหนดเป็นชนิด Number of Divisions ดังรูปที่ 3.2



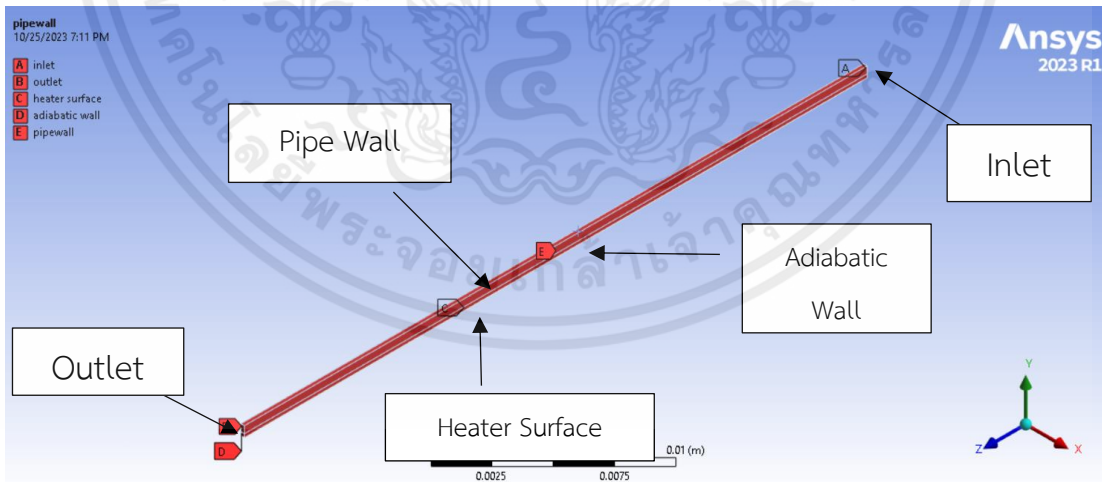
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองของท่อไมโครเซนแนลแบบท่อตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<input checked="" type="checkbox"/> <b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	Default (1.8003e-003 m)
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (3.6006e-003 m)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (9.0014e-006 m)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (1.8003e-005 m)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	3.6006e-002 m
Average Surface Area	6.02e-006 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	2.e-004 m
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Quality</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Inflation</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Advanced</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	378189
<input type="checkbox"/> Elements	320000
Show Detailed Statistics	No

รูปที่ 3.2 แสดงการตั้งค่าเมช

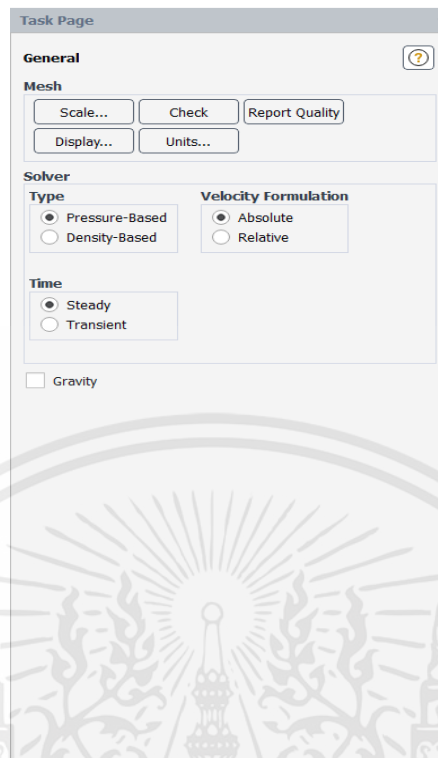
การกำหนดชื่อในส่วนต่างๆของท่อ เป็นไปดังรูป โดยมีความยาวท่อ คือ 36 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 0.267 mm



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนต่างๆของท่อไมโครเซนแนลแบบท่อตรง

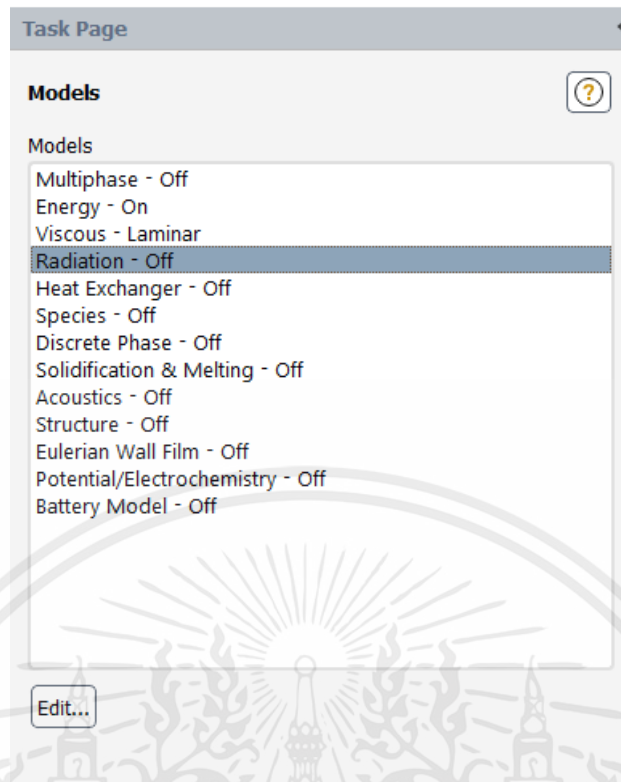
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)



รูปที่ 3.4 แสดงการตั้งค่าทั่วไป

การกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองในหัวข้อ General กำหนดการไหลเป็นแบบ Steady ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วงเนื่องจากของไหลไหลในท่อแนวนอน ใช้ Solver ชนิด Pressure-Based แสดงรายละเอียดการกำหนดค่าต่างๆดังรูปที่ 3.4

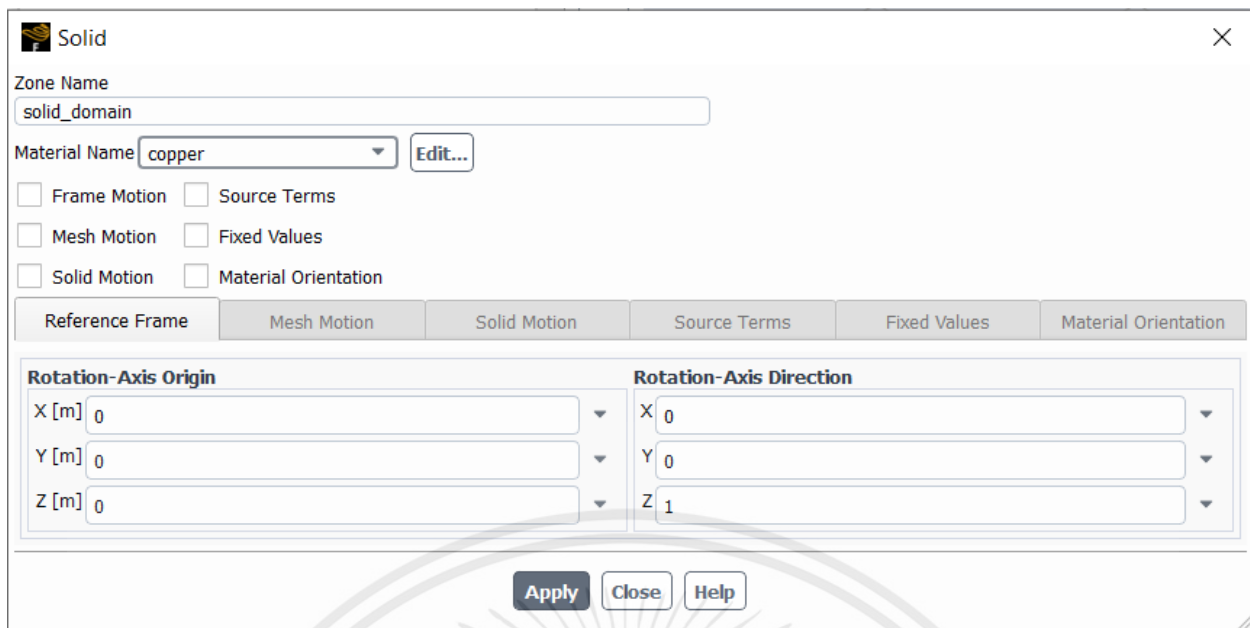


รูปที่ 3.5 แสดงการตั้งค่าแบบจำลอง  
การกำหนดค่าในหัวข้อ Model กำหนดการไหลเป็นสถานะเดียว เปิดใช้งานการแก้สมการ  
Energy ในการแก้ปัญหาใช้ Viscous model แบบ Laminar ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 แสดงการตั้งค่า material ของ fluid zone

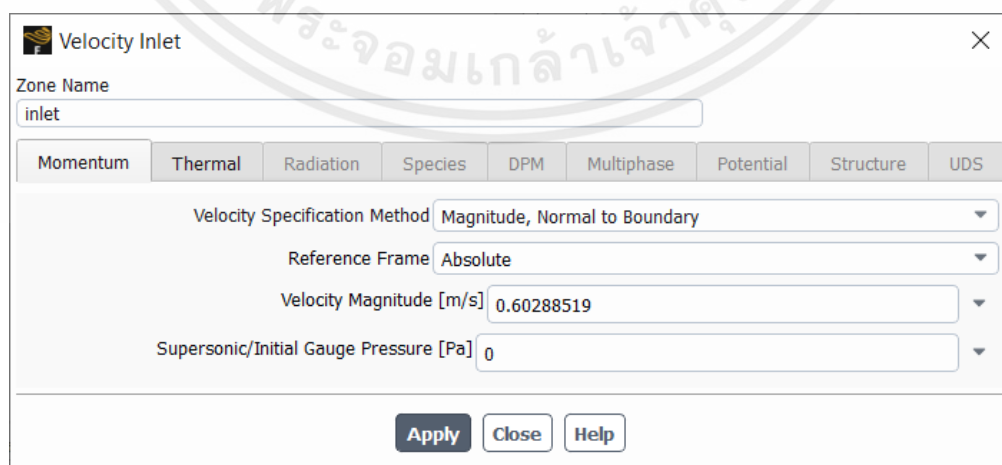
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงการตั้งค่า material ของ solid zone

กำหนด Materials ในหัวข้อ Cell Zone Condition ของ fluid zone เป็น water-liquid และของ solid zone เป็น copper ดังรูปที่ 3.6 แล 3.7

การกำหนด Boundary Conditions ที่ Inlet เป็น Uniform velocity ( $u = U, v = w = 0$ ) และ Uniform Temperature ( $T_{in} = 295 K$ ) ที่ Outlet เป็น Constant pressure (1 atm) ที่ Substrate-fluid interface ใช้เป็น No slip ( $u = v = w = 0$ ) และ Coupled ( $-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_f$ ) ที่ Bottom surface ใช้เป็น Constant Heat flux ( $q_w = 500 kW/m^2$ ) ส่วน Surface อื่นๆ จะใช้เงื่อนไขเป็น Adiabatic wall ( $q = -k \frac{\partial T}{\partial n} = 0$ )



รูปที่ 3.8 แสดงการตั้งค่าความเร็วของน้ำที่ทางเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Velocity Inlet**

Zone Name  
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Temperature [K] 295

Apply Close Help

รูปที่ 3.9 แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้า

**Pressure Outlet**

Zone Name  
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [atm] 1

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

Prevent Reverse Flow

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Average Pressure Specification

Target Mass Flow Rate

Apply Close Help

รูปที่ 3.10 แสดงการตั้งค่าที่ทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Wall** [Close]

Zone Name: heater\_surface

Adjacent Cell Zone: solid\_domain

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

**Thermal Conditions**

Heat Flux Heat Flux [W/m<sup>2</sup>]: 500000

Temperature Wall Thickness [m]: 0

Convection Heat Generation Rate [W/m<sup>3</sup>]: 0

Radiation

Mixed

via System Coupling

via Mapped Interface

Shell Conduction 1 Layer [Edit...]

Material Name: copper [Edit...]

[Apply] [Close] [Help]

รูปที่ 3.11 แสดงการตั้งค่า heat flux

**Wall** [Close]

Zone Name: wall-fluid\_domain-solid\_domain

Adjacent Cell Zone: solid\_domain

Shadow Face Zone: wall-fluid\_domain-solid\_domain-shadow

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

**Thermal Conditions**

Heat Flux

Temperature Wall Thickness [m]: 0

Coupled Heat Generation Rate [W/m<sup>3</sup>]: 0

Shell Conduction 1 Layer [Edit...]

Material Name: copper [Edit...]

[Apply] [Close] [Help]

รูปที่ 3.12 แสดงการตั้งค่า substrate-fluid interface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wall

Zone Name  
wall-fluid\_domain-solid\_domain-shadow

Adjacent Cell Zone  
fluid\_domain

Shadow Face Zone  
wall-fluid\_domain-solid\_domain

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

**Wall Motion** **Motion**

Stationary Wall  Relative to Adjacent Cell Zone

Moving Wall

**Shear Condition**

No Slip

Specified Shear

Specularity Coefficient

Marangoni Stress

**Wall Roughness**

Roughness Height [m] 0

Roughness Constant 0.5

Apply Close Help

รูปที่ 3.13 แสดงการตั้งค่า substrate-fluid interface

Wall

Zone Name  
adiabatic\_wall

Adjacent Cell Zone  
solid\_domain

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

**Thermal Conditions**

Heat Flux Heat Flux [W/m<sup>2</sup>] 0

Temperature

Convection

Radiation

Mixed

via System Coupling

via Mapped Interface

Wall Thickness [m] 0

Heat Generation Rate [W/m<sup>3</sup>] 0

Shell Conduction 1 Layer Edit...

Material Name  
copper Edit...

Apply Close Help

รูปที่ 3.14 แสดงการตั้งค่าผนังด้านที่เหลื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาผลเฉลยของความดันและความเร็วใช้ระเบียบวิธีแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) และใช้ Least-square cell-based method เพื่อแยก ความเร็ว, อุณหภูมิ และ ความแตกต่างของความดัน ดังรูปที่ 3.15

**Solution Methods** ?

**Pressure-Velocity Coupling**

Scheme: SIMPLE

Flux Type: Rhie-Chow: momentum based  Auto Select

**Spatial Discretization**

Gradient: Least Squares Cell Based

Pressure: Second Order

Momentum: Second Order Upwind

Energy: Second Order Upwind

Pseudo Time Method: Off

Transient Formulation

Non-Iterative Time Advancement

Frozen Flux Formulation

Warped-Face Gradient Correction

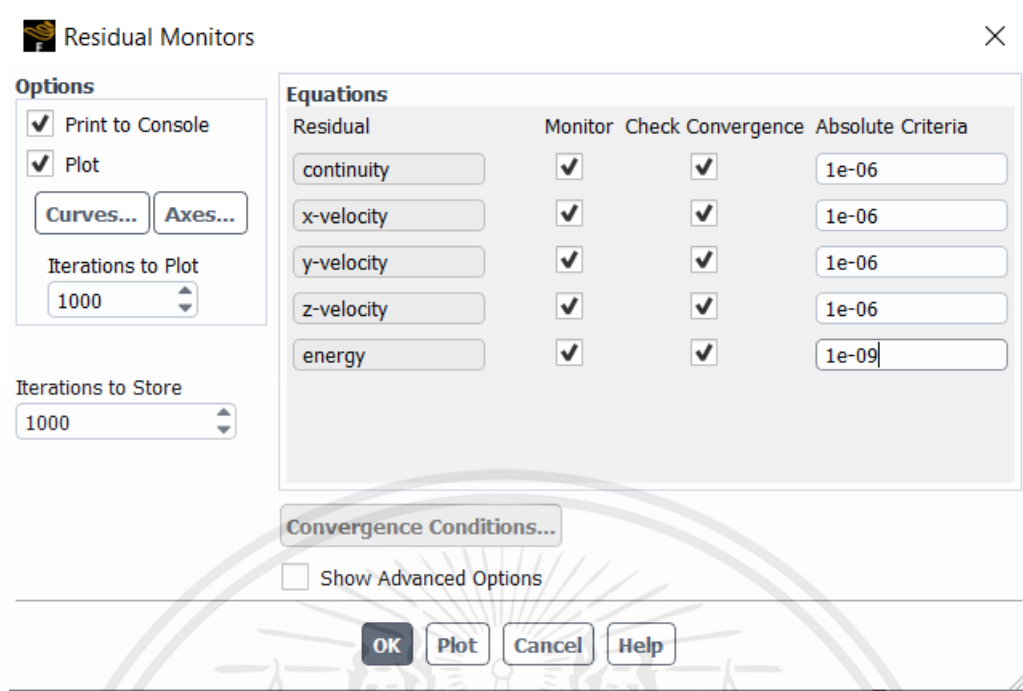
High Order Term Relaxation

Default

รูปที่ 3.15 แสดงการหาผลเฉลยความดันและความเร็ว

ในหัวข้อ Residual Monitors กำหนดการลู่ออกของผลเฉลยสำหรับ continuity เป็น  $1 \times 10^{-6}$  และสำหรับ energy เป็น  $1 \times 10^{-9}$  ดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงการตั้งค่า Residual

กำหนดวิธีสมมติค่าตอบเริ่มต้นแบบ Standard Initialization โดยให้ค่านวนในทุกๆ zone ดังรูป จากนั้นกำหนดจำนวนรอบของการ Iteration เป็น 1000 รอบและทำการ Run Calculation ดังรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Solution Initialization** ?

**Initialization Methods**

Hybrid Initialization

Standard Initialization

Compute from

all-zones

**Reference Frame**

Relative to Cell Zone

Absolute

**Initial Values**

Gauge Pressure [atm]

0

X Velocity [m/s]

0

Y Velocity [m/s]

0

Z Velocity [m/s]

0

Temperature [K]

295

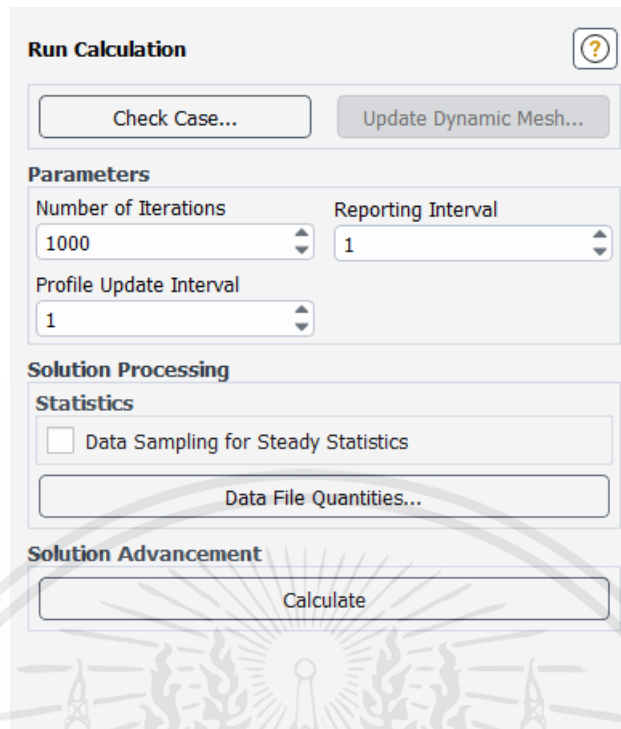
Initialize Reset Patch...

Reset DPM Sources Reset LWF Reset Statistics

VOF Check

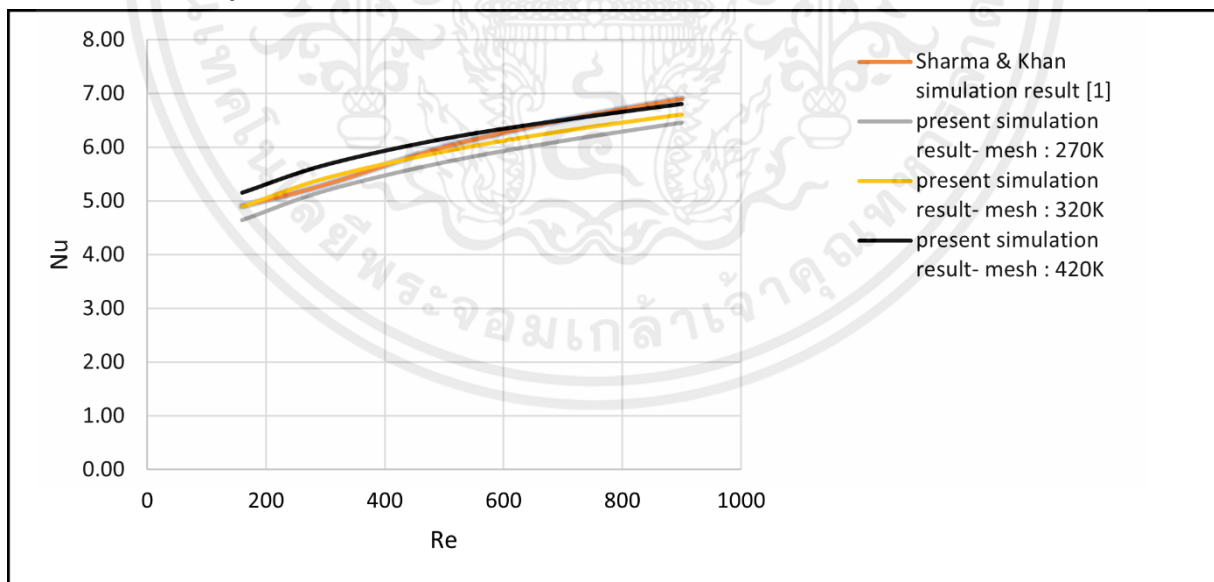
รูปที่ 3.17 แสดงการสมมติค่าตอบเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แสดงการตั้งค่า Run Calculation

สำหรับเมชที่เหมาะสมกับแบบจำลอง จะพิจารณาจากเลขนัสเซิลต์ (Nusselt Number) และ แฟคเตอร์ความเสียดทาน (friction factor) โดยเปรียบเทียบกับผลการจำลองของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7] ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และ 3.20

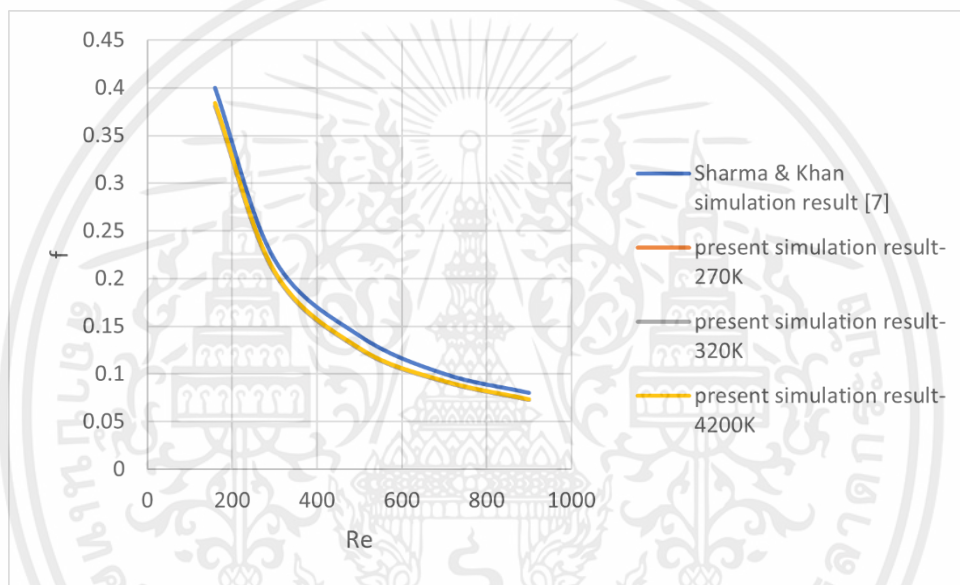


รูปที่ 3.19 แสดงค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของท่อไมโครแชนแนลแบบท่อตรง ที่จำนวนเมช 270K, 320K และ 420K elements เทียบกับผลการจำลองของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของผลการจำลอง ที่จำนวนเมช 270K, 320K และ 420K elements เทียบกับของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7]

Re	160	300	500	700	900	Avg
%error at 270K	5.31	2.08	4.67	5.85	6.38	4.85
%error at 320K	0.204	2.26	1.33	3.08	4.20	2.22
%error at 420K	5.10	6.98	2.67	0.153	1.30	3.24



รูปที่ 3.20 แสดงค่าแฟคเตอร์ความเสียหายเฉลี่ยของท่อไมโครเซนแนลแบบท่อตรง ที่จำนวนเมช 270K, 320K และ 420K elements เทียบกับผลการจำลองของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7]

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าแฟคเตอร์ความเสียหายเฉลี่ยของผลการจำลอง ที่จำนวนเมช 270K, 320K และ 420K elements เทียบกับของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan [7]

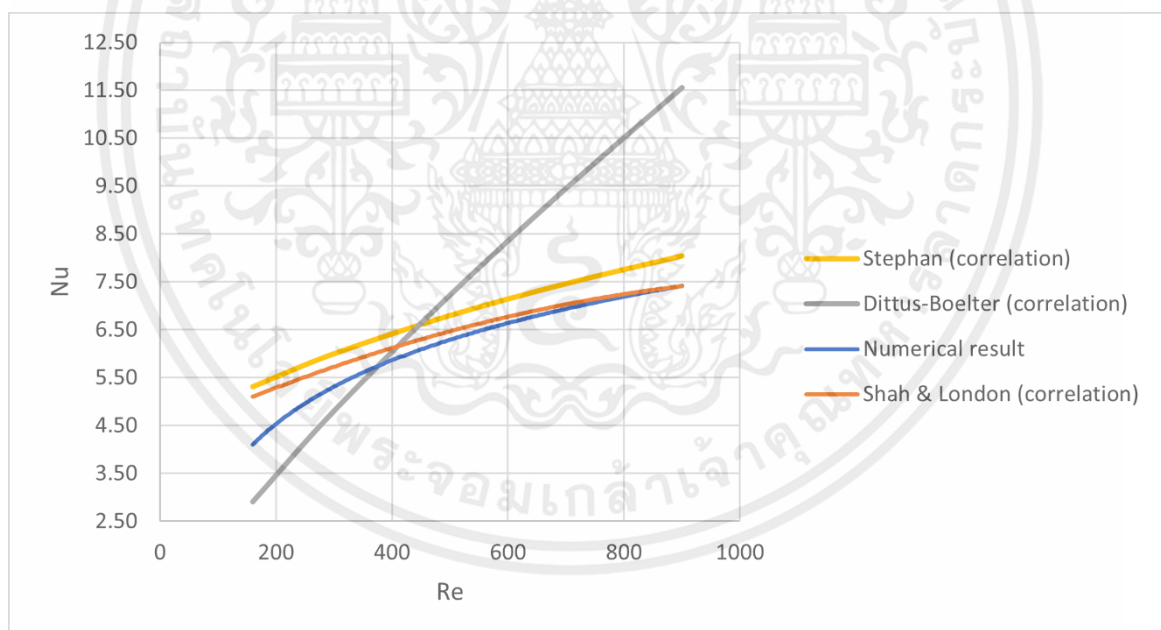
Re	160	300	500	700	900	Avg
%error at 270K	4.80	6.30	9.79	7.94	8.70	7.51
%error at 320K	4.74	6.23	9.71	7.88	8.62	7.44
%error at 420K	4.00	5.49	9.00	7.09	7.88	6.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.19 และ 3.20 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนเมชจาก 270K เป็น 320K ค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยลดลง 2.63% แต่เมื่อเพิ่มเมชเป็น 420K ค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย กลับเพิ่มขึ้น 1.02% ในส่วนของค่าความคลาดเคลื่อนของแฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ย นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากในทุกความละเอียดเมช ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้จำนวนเมชที่ 320K ในการสร้างแบบจำลอง

จากรูปที่ 3.19 และ 3.20 แสดงเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย และแฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ยของการไหลของน้ำในท่อไมโครแชนแนลแบบท่อตรง จะเห็นว่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นที่เลขเรย์โนลด์์ เพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันยิ่งเลขเรย์โนลด์์ สูงขึ้นค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ยจะยิ่งลดลง โดยจากตารางที่ 3.1 และ 3.2 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Ankur Sharma และ Mohd. Kaleem Khan พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย น้อยสุดเท่ากับ 0.204% และมากที่สุดที่ 4.20% ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของแฟคเตอร์ความเสียดทานเฉลี่ย น้อยสุดที่ 4.74% และสูงสุดที่ 9.71% จากผลดังกล่าวจะเห็นว่าแบบจำลองมีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษาได้

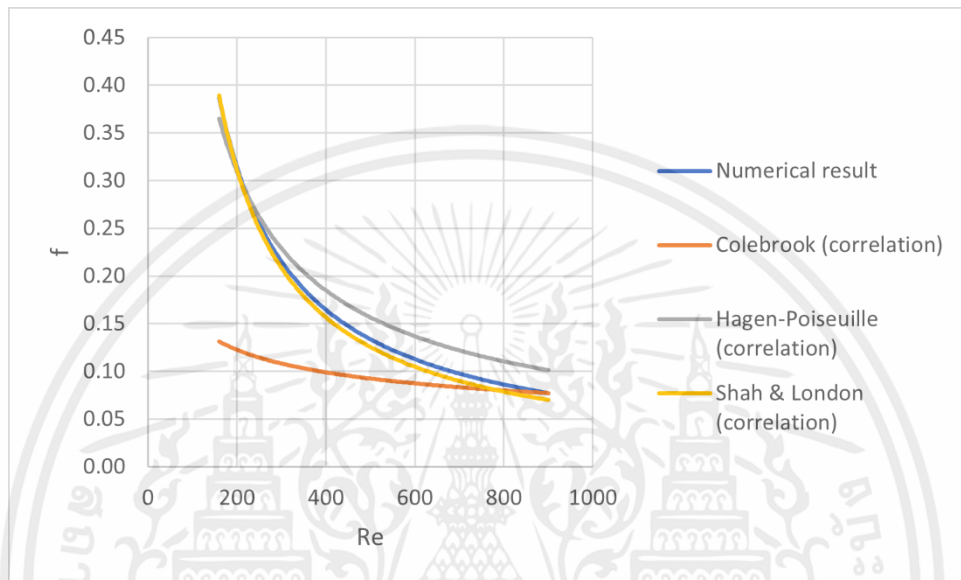
### 3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation)



รูปที่ 3.21 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของเลขนัสเซิลต์ของแบบจำลอง

รูปที่ 3.21 แสดงเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการสหสัมพันธ์ต่างๆผลที่ได้พบว่า ผลการคำนวณเชิงตัวเลขในการศึกษานี้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองของ Shah and London ในสมการที่ (16) และ Stephan ในสมการที่ (17) ซึ่งต่างเป็นสหสัมพันธ์สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนล และไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดลองของ Dittus-Boelter ในสมการที่ (18) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในไมโครแชนเนล ทำให้เป็นอีกหนึ่งเหตุผลสนับสนุนว่าในการศึกษานี้การไหลเป็นแบบราบเรียบนอกจากเหตุผลจากช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่เลือกใช้ในการศึกษานี้



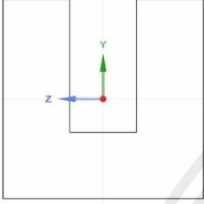




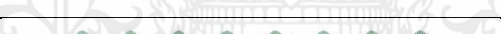



รูปที่ 3.22 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของแฟคเตอร์ความเสียดทานของแบบจำลอง

รูปที่ 3.22 แสดงค่าแฟคเตอร์ความเสียดทานที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากสมการสหสัมพันธ์ต่างๆผลที่ได้พบว่า ผลการคำนวณเชิงตัวเลขในการศึกษานี้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดลองของ Shah and London ในสมการที่ (21) และ Hagen-Poiseuille ในสมการที่ (19) ซึ่งต่างเป็นสหสัมพันธ์สำหรับการไหลแบบราบเรียบในไมโครแชนเนล และไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดลองของ Colebrook ในสมการที่ (20) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในไมโครแชนเนลแต่จะเริ่มสอดคล้องเมื่อเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น ทำให้เป็นอีกหนึ่งเหตุผลสนับสนุนว่าในการศึกษานี้การไหลเป็นแบบราบเรียบนอกจากเหตุผลจากช่วงของเลขเรย์โนลด์เลือกใช้ในการศึกษานี้

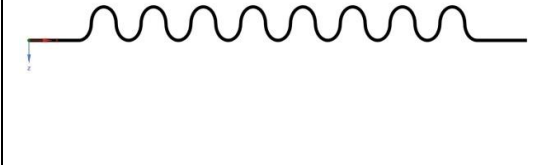
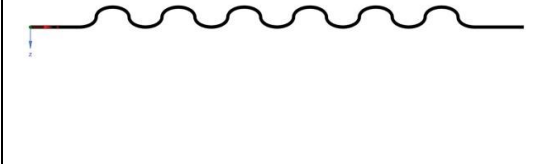


### 3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 10 แบบจำลอง โดยแบ่งเป็น ไมโครแซนแนลแบบทอตรง 1 แบบจำลอง ไมโครแซนแนลแบบทอคลื่นรูปไซน์ 1 แบบจำลอง และไมโครแซนแนลแบบทอคลื่นรูปวงรี 8 แบบจำลอง โดยกำหนดเลขเรย์โนลด์ 5 ค่า คือ 160, 300, 500, 700 และ 900 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงแบบจำลองที่ทำการศึกษา

Cross section	Top view	Geometry Names	Detail
		Straight	$A_s = 30 \text{ mm}^2$
		S1	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 0.4 \text{ mm}$ ; $A_s = 33.8 \text{ mm}^2$
		S2	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 0.6 \text{ mm}$ ; $A_s = 37.7 \text{ mm}^2$
		S3	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 0.8 \text{ mm}$ ; $A_s = 42.3 \text{ mm}^2$
		S4	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 1.0 \text{ mm}$ ; $A_s = 47.4 \text{ mm}^2$
		E1	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 0.4 \text{ mm}$ ; $A_s = 35.7 \text{ mm}^2$
		E2 & L1	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 0.6 \text{ mm}$ ; $A_s = 40.0 \text{ mm}^2$
		E3	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 0.8 \text{ mm}$ ; $A_s = 45.3 \text{ mm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	E4	$\lambda = 3 \text{ mm}$ ; $A = 1.0 \text{ mm}$ ; $A_s = 50.0 \text{ mm}^2$
	L2	$\lambda = 4 \text{ mm}$ ; $A = 0.4 \text{ mm}$ ; $A_s = 36.6 \text{ mm}^2$
	L3	$\lambda = 6 \text{ mm}$ ; $A = 0.4 \text{ mm}$ ; $A_s = 33.6 \text{ mm}^2$
	L4	$\lambda = 8 \text{ mm}$ ; $A = 0.4 \text{ mm}$ ; $A_s = 32.3 \text{ mm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

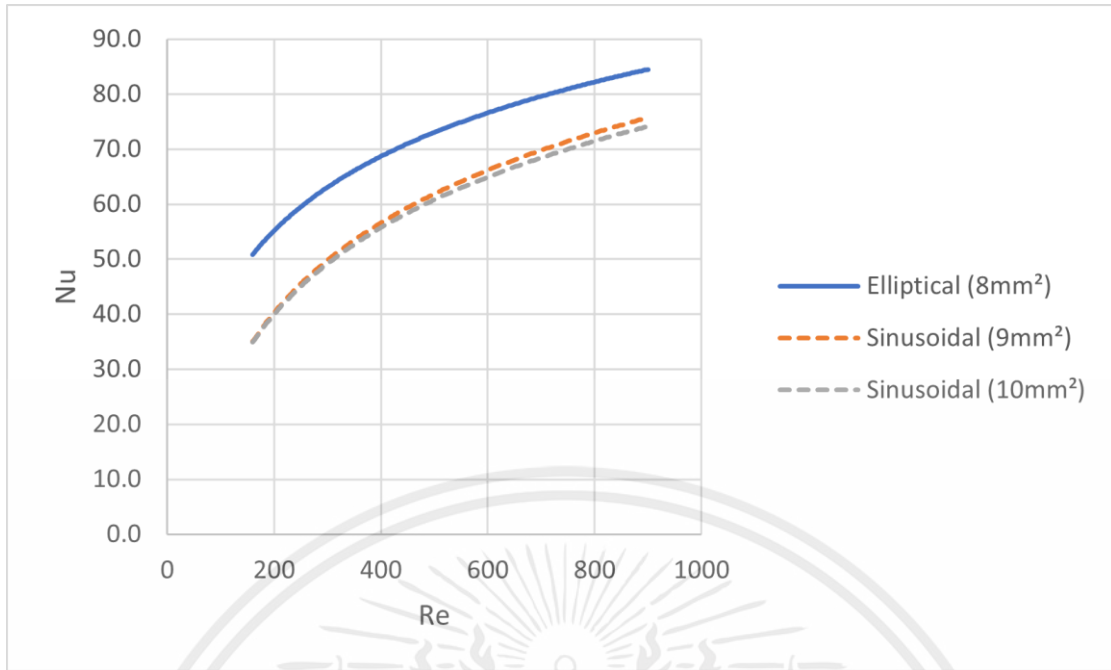
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

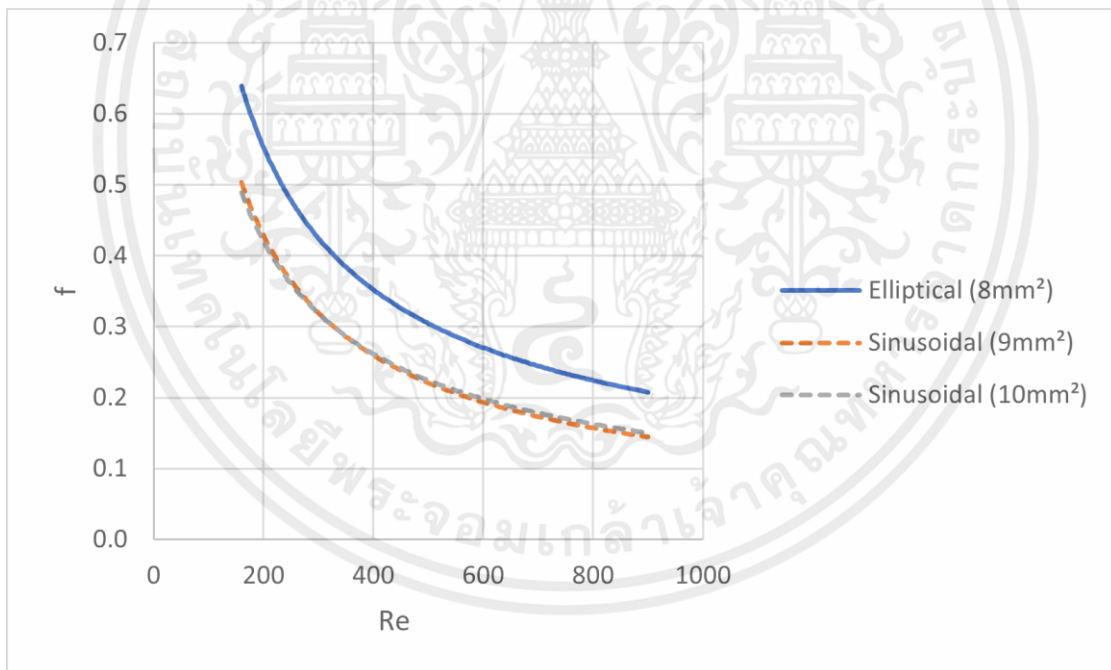
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไมโครเซนแนลที่รูปร่าง แอมพลิจูด และพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนต่างๆ โดยแผนกระจายความร้อนทำจากทองแดง โดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น

#### 4.1 อิทธิพลของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับรูปร่างของไมโครเซนแนล

นอกจากรูปร่างของไมโครเซนแนลที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น พื้นที่การถ่ายโอนความร้อนก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนเช่นกัน โดยเมื่อพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนมากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งความดันตกเพิ่มขึ้น ในการศึกษานี้ได้มีการใช้ไมโครเซนแนลที่มีรูปร่างแตกต่างกัน โดยที่ไม่ได้ทำให้ขนาดพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเท่ากันทำให้ต้องมีการศึกษาอิทธิพลของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนต่อปริมาณการถ่ายโอนความร้อน และความดันตกเมื่อเทียบกับอิทธิพลของรูปร่างของไมโครเซนแนล ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนเทียบกับรูปร่างของไมโครเซนแนล จากรูปที่ 4.1(ก) ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีพื้นที่  $10 \text{ mm}^2$  มีเลขนัสเซิลต์เปลี่ยนไป 1.62% เมื่อเทียบกับไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีพื้นที่  $9 \text{ mm}^2$  และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีพื้นที่  $8 \text{ mm}^2$  มีเลขนัสเซิลต์สูงขึ้น 20.1% เมื่อเทียบกับไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีพื้นที่  $9 \text{ mm}^2$  และจากรูปที่ 4.1(ข) ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีพื้นที่  $10 \text{ mm}^2$  มีแฟคเตอร์ความเสียดทานเปลี่ยนไป 0.051% เมื่อเทียบกับไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีพื้นที่  $9 \text{ mm}^2$  และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีพื้นที่  $8 \text{ mm}^2$  มีแฟคเตอร์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น 33.3% เมื่อเทียบกับไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีพื้นที่  $9 \text{ mm}^2$  ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าผลของพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนมีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกในไมโครเซนแนลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของรูปร่างของไมโครเซนแนล ทำให้เราสามารถเปรียบเทียบการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกระหว่างไมโครเซนแนลรูปร่างต่างๆที่นำมาเปรียบเทียบกันได้โดยพิจารณาได้ว่าพื้นที่การถ่ายโอนความร้อน



(ก) อิทธิพลของพื้นที่ของไมโครแชนแนลต่อเลขนัสเซิลต์



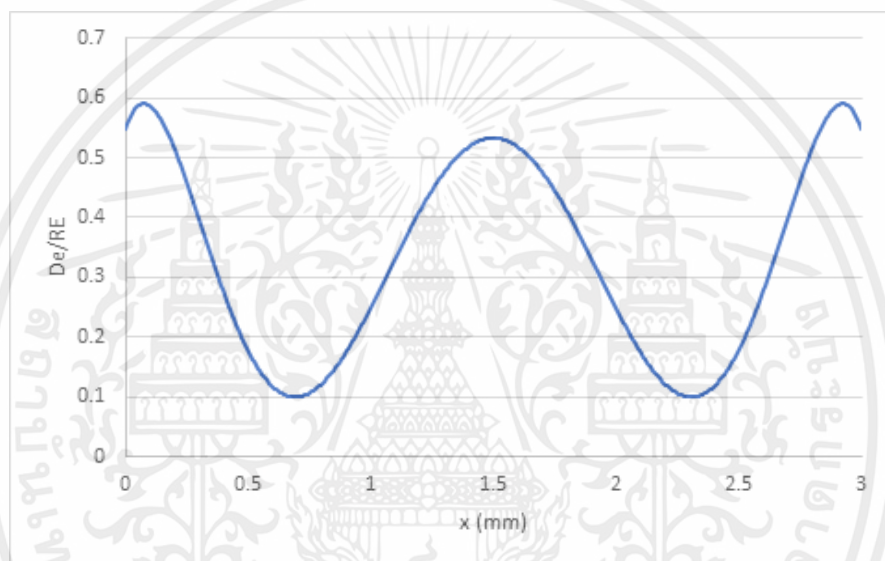
(ข) อิทธิพลของพื้นที่ของไมโครแชนแนลต่อแฟคเตอร์ความเสียดทาน

**รูปที่ 4.1** กราฟแสดงอิทธิพลของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับรูปร่างของไมโครแชนแนลที่มีต่อเลขนัสเซิลต์และแฟคเตอร์ความเสียดทานที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ โดย ก) อิทธิพลของพื้นที่ของไมโครแชนแนลต่อเลขนัสเซิลต์ ข) อิทธิพลของพื้นที่ของไมโครแชนแนลต่อแฟคเตอร์ความเสียดทาน

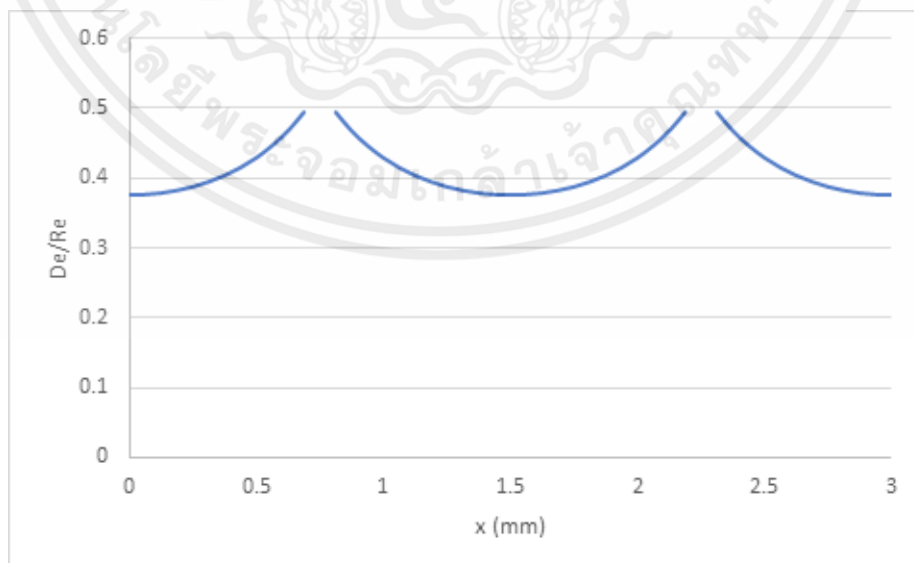
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลของรูปร่างที่มีต่อการถ่ายโอนความร้อนและความดันตก

ในการใช้ไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงในการถ่ายโอนความร้อนให้การถ่ายโอนความร้อนในระดับหนึ่ง เมื่อต้องการให้การถ่ายโอนความร้อนมากขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มการไหลวนแบบทุติยภูมิในไมโครเซนแนล จึงทำให้การถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นแต่ต้องแลกมากับความดันตกที่มากขึ้นโดยการทำให้อ้อมมีความโค้งที่มีค่ารัศมีความโค้งที่จุดต่างๆบนไมโครเซนแนลน้อยลง รัศมีความโค้งของไมโครเซนแนลมีความสัมพันธ์กับตัวเลขดัดงสมการ (24) อัตราส่วนระหว่างเลขดัดกับเลขเรย์โนลด์ของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูด เป็น 0.6 mm และความยาวคลื่นเป็น 3 mm และคลื่นรูปวงรีที่มีแอมพลิจูด เป็น 0.6 mm และความยาวคลื่นเป็น 3 mm แสดงในรูป 4.2.1(ก) และ 4.2.1(ข) ตามลำดับ



(ก) ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์  $A = 0.6 \text{ mm}$   $\lambda = 3$



(ข) ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี  $A = 0.6 \text{ mm}$   $\lambda = 3$

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า  $De/Re$  ที่ตำแหน่ง  $x=3$  ถึง  $x=6 \text{ mm}$  ของ (ก) ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์  $A = 0.6 \text{ mm}$   $\lambda = 3 \text{ mm}$  (ข) ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี  $A = 0.6 \text{ mm}$   $\lambda = 3 \text{ mm}$

จากกราฟดังกล่าวไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ซึ่งมีความโค้งในทุกจุดเพิ่มขึ้นจากแบบเส้นตรง (รัศมี ความโค้งลดลง) มีค่า De/Re เฉลี่ยตลอดความยาวคลื่นเป็น 0.338 และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีความ ยาวคลื่นและแอมพลิจูดเท่ากับแบบคลื่นรูปไซน์มี De/Re เฉลี่ยตลอดความยาวคลื่นเป็น 0.414 จะเห็นได้ว่า De/Re เฉลี่ยตลอดความยาวคลื่นของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีค่าน้อยกว่า De/Re เฉลี่ยของไมโคร เซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี ดังนั้นรัศมีความโค้งเฉลี่ยตลอดความยาวคลื่นของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีค่า มากกว่ารัศมีความโค้งเฉลี่ยของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี ซึ่งในไมโครเซนแนล ยิ่ง De/Re เฉลี่ยมีค่ามาก หรือรัศมีความโค้งเฉลี่ยมีค่าน้อย ยิ่งทำให้การไหลทุติยภูมิมีค่ามาก

**ตารางที่ 4.1** เปรียบเทียบความเข้มของการไหลทุติยภูมิเฉลี่ยระหว่างไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และแบบ คลื่นรูปวงรี

Sinusoidal Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
Secondary Flow ,J (s <sup>-1</sup> )	2.85E-12	4.19E+04	7.65E+04	1.15E+05	1.54E+05
Secondary Flow Intensity ,Se	2.02E-13	2.96E+03	5.41E+03	8.15E+03	1.09E+04
Average of Secondary Flow Intensity	5.49E+03				
Elliptical Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
Secondary Flow ,J (s <sup>-1</sup> )	1.90E+04	4.35E+04	8.14E+04	1.20E+05	1.58E+05
Secondary Flow Intensity ,Se	1.35E+03	3.08E+03	5.76E+03	8.50E+03	1.12E+04
Average of Secondary Flow Intensity	5.97E+03				
% Secondary Flow Intensity of Elliptical Wavy Microchannel with respect Sinusoidal Wavy Microchannel	8.78				

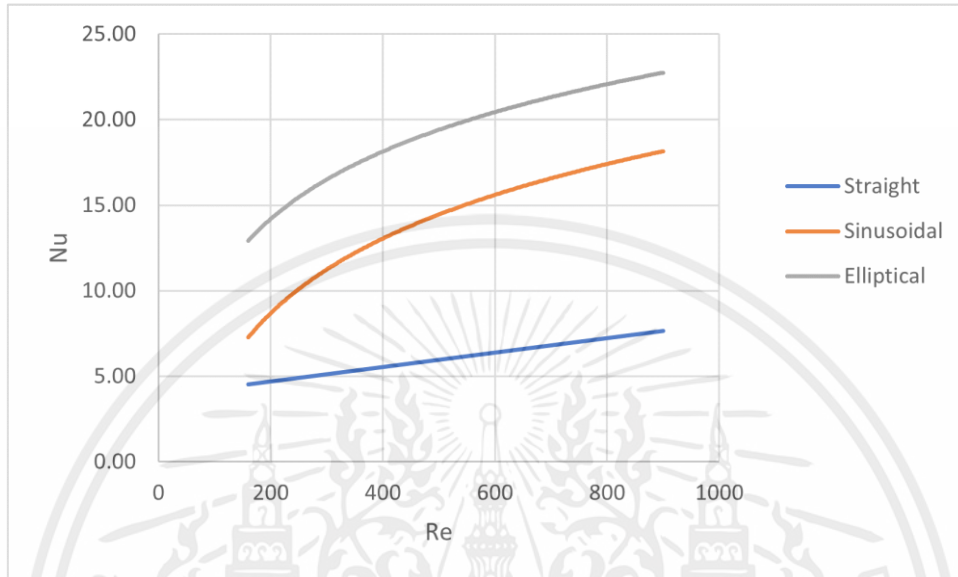
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 ค่าการไหลทุติยภูมิ (Secondary Flow, Secondary Vortices, Dean Vortices) ได้จากผลการคำนวณแบบจำลองแล้วถูกนำมาหาค่าความเข้มการไหลทุติยภูมิ (Secondary Flow Intensity) (ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่แสดงถึงความแรงของการไหลทุติยภูมิ) ด้วยสมการ (27) สังเกตว่าทั้งในไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และแบบคลื่นรูปวงรีความเข้มของการไหลทุติยภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น และสังเกตว่าค่าความเข้มของการไหลทุติยภูมิเฉลี่ยของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีมากกว่าความเข้มของการไหลทุติยภูมิเฉลี่ยของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ 8.78% ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกับ  $De/Re$  ของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีค่ามากกว่าค่า  $De/Re$  ของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ เนื่องจากความโค้งเฉลี่ยที่มากกว่าของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีทำให้เกิดการไหลแบบทุติยภูมิที่หน้าตัดเฉลี่ยตลอดความยาวคลื่นที่มากกว่า ซึ่งจะส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกในไมโครเซนแนลดังที่จะได้กล่าวต่อไป

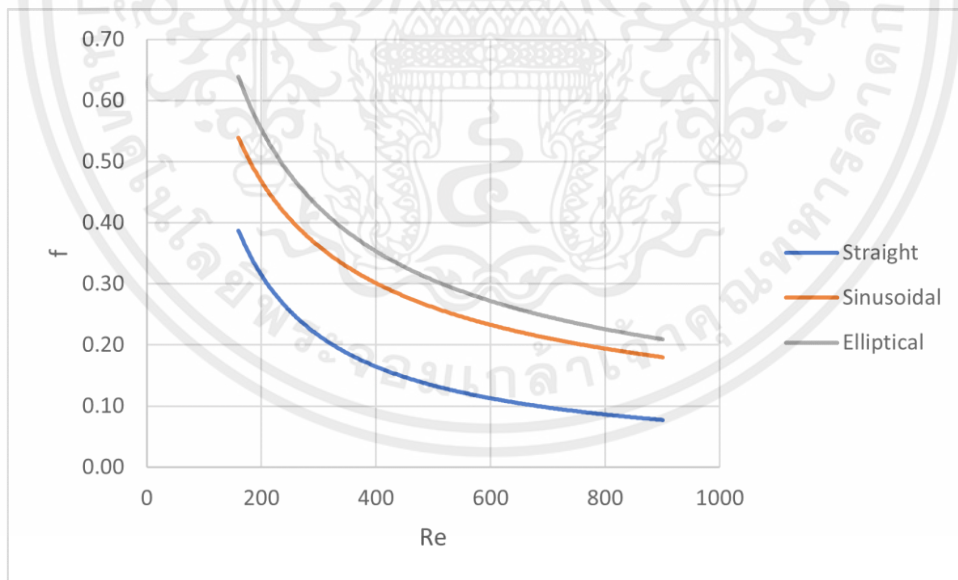
จากรูปที่ 4.3 เปรียบเทียบเลขนัสเซลต์ และแฟคเตอร์ความเสียหายของไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงแบบคลื่นรูปไซน์ และแบบคลื่นรูปวงรีที่มีเลขเรย์โนลด์ แอมพลิจูด และความยาวคลื่นเท่ากันเมื่อเทียบกับไมโครเซนแนลแบบทอตรง แล้วจากรูปที่ 4.3(ก) พบว่าที่  $Re = 160$  เลขนัสเซลต์ของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงเพิ่มขึ้น 90.3% และ 114% ตามลำดับ ที่  $Re = 300$  เพิ่มขึ้น 101% และ 114% ที่  $Re = 500$  เพิ่มขึ้น 121% และ 148% ที่  $Re = 700$  เพิ่มขึ้น 142% และ 163% และที่  $Re = 900$  เพิ่มขึ้น 151% เท่ากัน ซึ่งสังเกตว่าความแตกต่างลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.3(ข) พบว่าที่  $Re = 160$  แฟคเตอร์ความเสียหายของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงเพิ่มขึ้น 44.3% และ 65.7% ตามลำดับ ที่  $Re = 300$  เพิ่มขึ้น 68.4% และ 104% ที่  $Re = 500$  เพิ่มขึ้น 96.7% และ 134% ที่  $Re = 700$  เพิ่มขึ้น 124% และ 159% และที่  $Re = 900$  เพิ่มขึ้น 144% และ 175% ซึ่งโดยเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณาแล้วเลขนัสเซลต์ของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงเพิ่มขึ้น 121% และ 137% ตามลำดับและแฟคเตอร์ความเสียหายของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงเพิ่มขึ้น 95.3% และ 127% ตามลำดับ ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีให้การถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ตามมาด้วยไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ และไมโครเซนแนลแบบเส้นตรง และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีก็ให้ค่าแฟคเตอร์ความเสียหายมากที่สุด รองลงมาคือไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงตามลำดับ ซึ่งจะเป็นไปตามที่คาดไว้ว่าเมื่อเพิ่มความโค้งการไหล (เพิ่ม  $De/Re$ ) (ลดรัศมีความโค้ง) ให้กับไมโครเซนแนล กล่าวคือจากไมโครเซนแนลแบบเส้นตรง เป็นแบบคลื่น

รูปไซน์ และเป็นแบบคลื่นรูปวงรีตามลำดับจะทำให้การไหลวนแบบทุติยภูมิเพิ่มขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและความดันตกมากขึ้น



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu เกลี่ยตลอดความยาวกับ Re



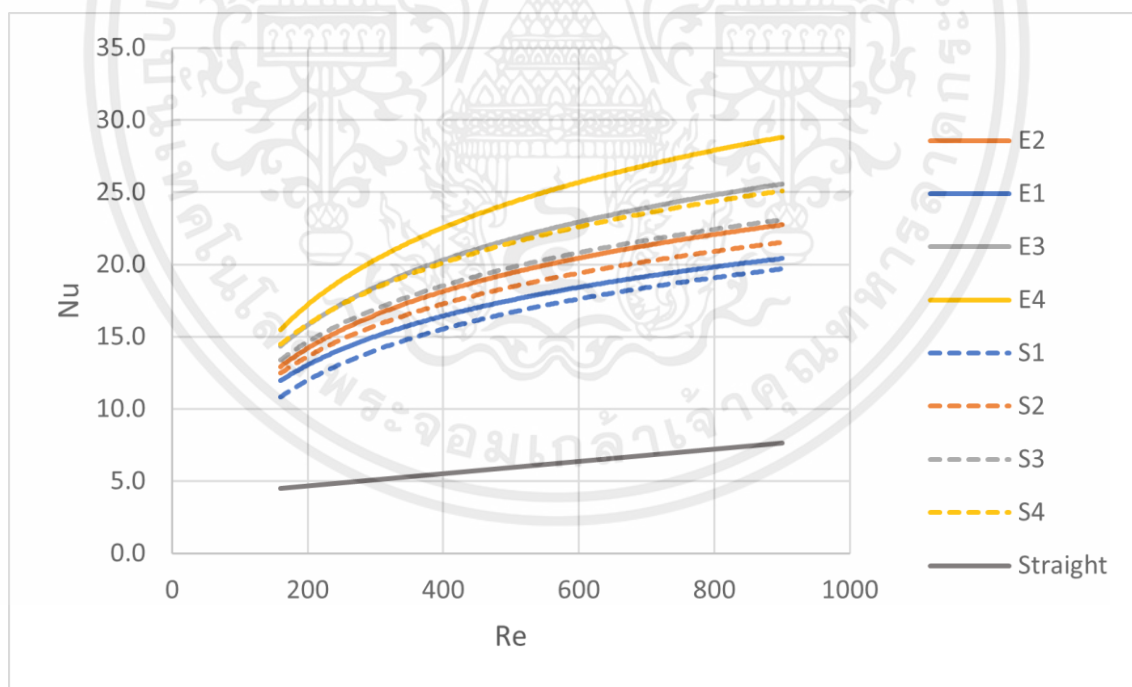
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง f เกลี่ยตลอดความยาวกับ Re

**รูปที่ 4.3** กราฟเปรียบเทียบ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu เกลี่ยตลอดความยาวกับ Re (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง f เกลี่ยตลอดความยาวกับ Re ระหว่างไมโครเซนแนล

เอกสารนี้เป็นแบบเส้นตรง แบบคลื่นรูปไซน์ และแบบคลื่นรูปวงรีที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

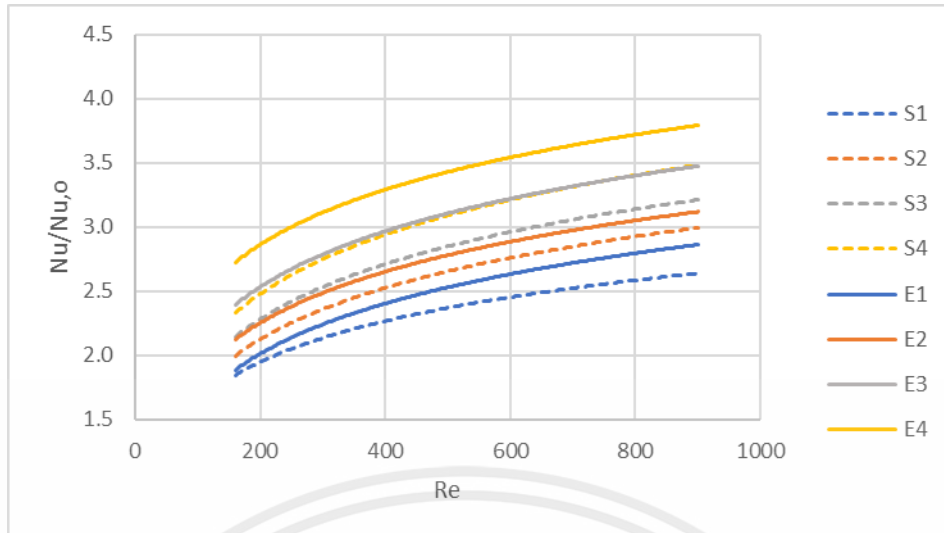
### 4.3 สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิก(Thermohydraulic Performance)

ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี 4 กรณี (E1-E4) ที่ความยาวคลื่น 3 mm เท่ากันทั้ง 4 กรณี แต่มีแอมพลิจูดต่างกัน ได้แก่ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 mm ตามลำดับ โดยใช้ไมโครเซนแนลแบบท่อตรงมาเป็นตัวเปรียบเทียบ จากรูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของเลขนัสเซิลต์ แฟคเตอร์ความเสียดทาน และค่าพารามิเตอร์สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกที่เลขเรย์โนลด์ค่าเดียวกันในทุกกรณี ซึ่งในทุกกรณี เลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่แฟคเตอร์แรงเสียดทานลดลงตามเลขเรย์โนลด์ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการไหล ในขณะที่แฟคเตอร์แรงเสียดทานจะแปรผกผันกับกำลังสองของความเร็วของการไหล จากภาพเป็นไปตามสมมติฐานว่าไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีมีเลขนัสเซิลต์และแฟคเตอร์ความเสียดทานมากที่สุดตามมาด้วยไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ และไมโครเซนแนลแบบท่อตรง ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของเลขนัสเซิลต์เป็นผลมาจากการเกิดกระแสน้ำวนของดินในขณะที่แฟคเตอร์ความเสียดทานที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนที่ผนังภายใต้การกระทำของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ในส่วนของการเพิ่มแอมพลิจูดนั้นทำให้เลขนัสเซิลต์และแฟคเตอร์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นสำหรับไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีทั้ง 4 กรณี (E1-E4) และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ทั้ง 4 กรณี (S1-S4) การไหลแบบทุติยภูมิหรือการหมุนวนแบบดินเพิ่มขึ้นเนื่องจากความโค้งของชาแนลเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มแอมพลิจูดของเซนแนล

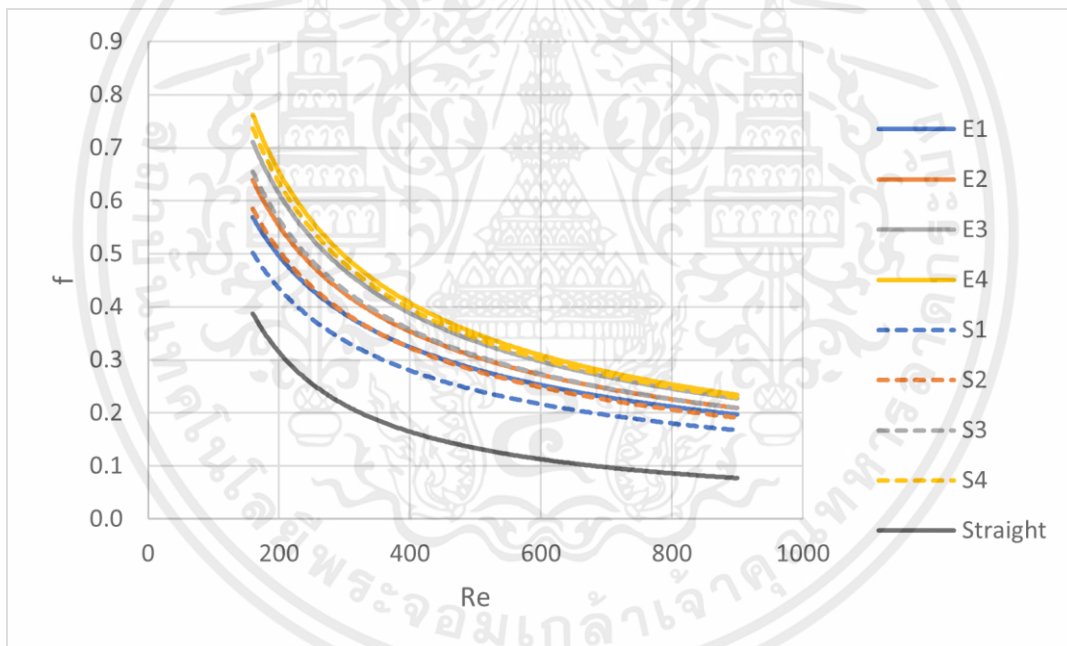


รูปที่ 4.4 เลขนัสเซิลต์ที่แอมพลิจูดทั้ง 4 กรณีของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี, แบบคลื่นรูปไซน์ และแบบเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

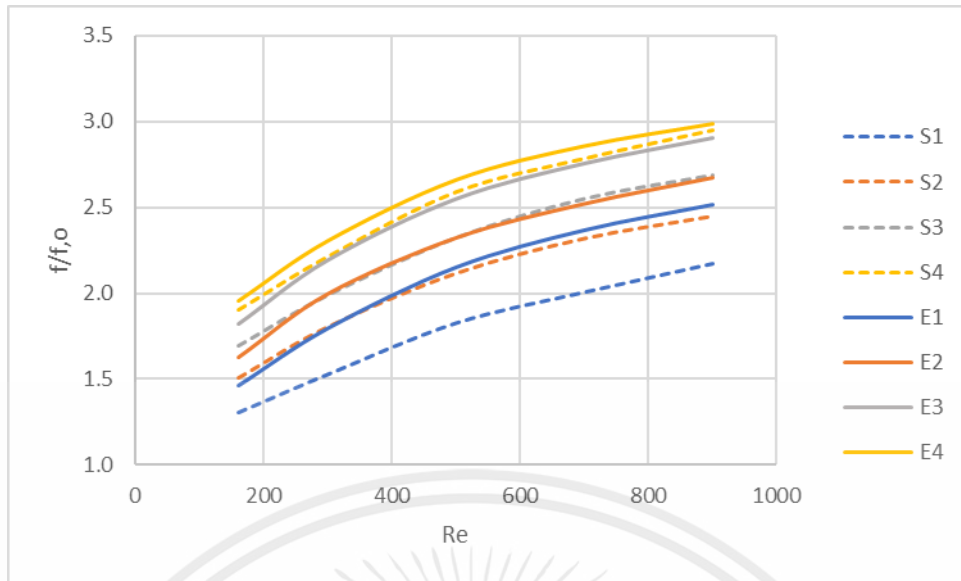


รูปที่ 4.5 เลขนัสเซลต์ที่แอมพลิฟิเคชันทั้ง 4 กรณีของไมโครแชนแนลแบบคลื่นรูปวงรี,แบบคลื่นรูปไซน์ เมื่อเทียบกับไมโครแชนแนลแบบเส้นตรง

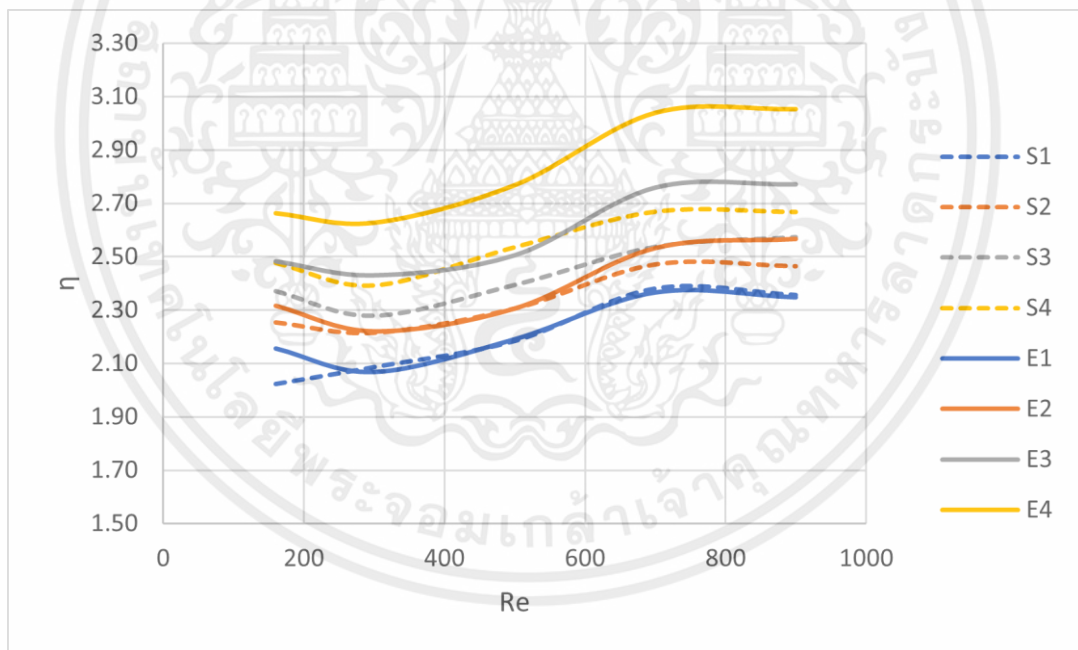


รูปที่ 4.6 แฟคเตอร์ความเสียดทานที่แอมพลิฟิเคชันทั้ง 4 กรณีของไมโครแชนแนลแบบคลื่นรูปวงรี,แบบคลื่นรูปไซน์ และแบบเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แพคเตอร์ความเสียดทานที่แอมพลิจูดทั้ง 4 กรณีของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี และแบบคลื่นรูปไซน์ เมื่อเทียบกับไมโครเซนแนลแบบเส้นตรง



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และแบบคลื่นรูปวงรีที่แอมพลิจูดต่างๆที่เลขเรย์โนลด์ค่าเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบเลขนัสเซิลต์ แฟคเตอร์ความเสียหาย และสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และแบบคลื่นรูปวงรีที่เลขเรย์โนลด์ค่าเดียวกัน

	Nu	f	$\eta$	% Nu increase	% f increase	% $\eta$ increase
E1	1.68E+01	3.33E-01	2.23E+00	5.52E+00	1.51E+01	9.05E-01
E2	1.86E+01	3.65E-01	2.39E+00	5.09E+00	9.32E+00	2.14E+00
E3	2.08E+01	4.02E-01	2.59E+00			
E4	2.32E+01	4.24E-01	2.83E+00			
S1	1.59E+01	2.89E-01	2.21E+00			
S2	1.77E+01	3.34E-01	2.34E+00	1.10E+01	1.54E+01	5.88E+00
S3	1.90E+01	3.70E-01	2.43E+00	7.31E+00	1.09E+01	3.85E+00
S4	2.06E+01	4.13E-01	2.55E+00			

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบเลขนัสเซิลต์ แฟคเตอร์ความเสียหาย และสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกระหว่างไมโครเซนแนล หมายเลขเดียวกัน

	Nu	f	$\eta$	% Nu increase	% f increase	% $\eta$ increase
E1	1.68E+01	3.33E-01	2.23E+00	5.08E+00	1.52E+01	9.05E-01
E2	1.86E+01	3.65E-01	2.39E+00	5.66E+00	9.28E+00	2.14E+00
E3	2.08E+01	4.02E-01	2.59E+00	9.47E+00	8.65E+00	6.58E+00
E4	2.32E+01	4.24E-01	2.83E+00	1.26E+01	2.66E+00	1.10E+01
S1	1.59E+01	2.89E-01	2.21E+00			
S2	1.77E+01	3.34E-01	2.34E+00			
S3	1.90E+01	3.70E-01	2.43E+00			
S4	2.06E+01	4.13E-01	2.55E+00			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่าไมโครแซนแนล E1 มีเลขนัสเซลล์เฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณามากกว่า S1 5.52% และ S2 มีเลขนัสเซลล์เฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณามากกว่า S1 11% และสังเกตไมโครแซนแนล E2 มีเลขนัสเซลล์เฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณามากกว่า S2 5.09% และ S3 มีเลขนัสเซลล์เฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณามากกว่า S2 7.31% ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีอิทธิพลต่อการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าการเปลี่ยนรูปร่างเป็น ไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีในช่วงแอมพลิจูดที่พิจารณาและช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2 สังเกตว่าไมโครแซนแนล E1 มีค่าแฟคเตอร์ความเสียหายเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณามากกว่า S1 15.1% และ S2 มีค่าแฟคเตอร์ความเสียหายเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณามากกว่า S1 15.4% และสังเกตไมโครแซนแนล E2 มีค่าแฟคเตอร์ความเสียหายเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา มากกว่า S2 9.32% และ S3 มีค่าแฟคเตอร์ความเสียหายเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา มากกว่า S2 10.9% ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือการเพิ่มแอมพลิจูดของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีอิทธิพลต่อความดันตกมากกว่าการเปลี่ยนรูปร่างเป็นไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีในช่วงแอมพลิจูดที่พิจารณาและช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.2 สังเกตว่าไมโครแซนแนล E1 มีค่าสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา มากกว่า S1 0.905% และ S2 มีค่าสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา มากกว่า S1 5.88% และสังเกต ไมโครแซนแนล E2 มีค่าสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา มากกว่า S2 2.14% และ S3 มีค่าสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกเฉลี่ยตลอดเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา มากกว่า S2 3.85% ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือการเพิ่มแอมพลิจูดของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าการเปลี่ยนรูปร่างเป็นไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีในช่วงแอมพลิจูดที่พิจารณาและช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3 ไมโครแซนแนล E1 มีเลขนัสเซลล์เพิ่มขึ้นจากไมโครแซนแนล S1 โดยเฉลี่ย 5.08% E2 เพิ่มขึ้นจากโดยเฉลี่ย 5.66% E3 เพิ่มขึ้นจาก S3 โดยเฉลี่ย 9.47% และ E4 เพิ่มขึ้นจาก S4 โดยเฉลี่ย 12.4% และสังเกตว่าความแตกต่างเลขนัสเซลล์ของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีกับเลขนัสเซลล์ของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่สอดคล้องกันมีความมากขึ้นเมื่อแอมพลิจูดมีค่ามากขึ้น จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 แฟคเตอร์ความเสียหายของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี E1, E2, E3, E4 เพิ่มขึ้นจากไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ S1, S2, S3, S4 ในจำนวน 15.2% 9.28% 8.65% และ 2.66% ตามลำดับและสังเกตว่าความแตกต่างแฟคเตอร์ความเสียหายของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีกับเลขนัสเซลล์ของไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ที่สอดคล้องกันมีความมากขึ้นเมื่อแอมพลิจูดมีค่าลดลง

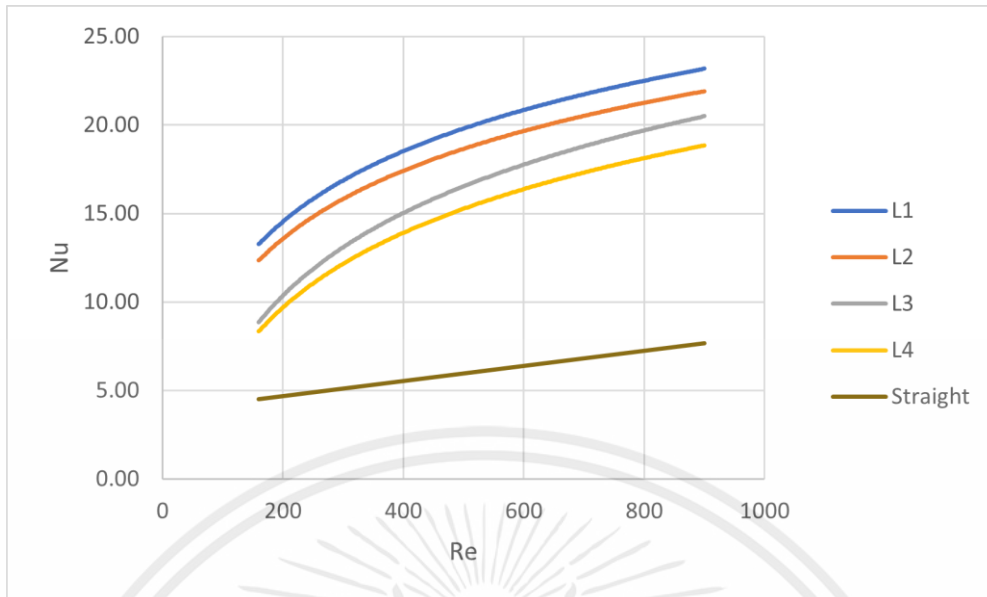
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3 ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีมีประสิทธิภาพเหนือกว่าไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ในด้านสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกซึ่งหาจากรูปที่ 4.4-4.7 ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีแอมพลิจูดมากที่สุด (E4) เป็นไมโครเซนแนลที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในสำหรับเลขเรย์โนลด์ทั้งหมด ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของสมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกสำหรับช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา จากตารางดังกล่าวโดยเฉลี่ยแล้ว E1 มีประสิทธิภาพดีกว่า S1 0.905%, E2 ดีกว่า S2 2.14%, E3 ดีกว่า S3 6.58% และ E4 ดีกว่า S4 11% ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าสมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์เข้าใกล้สมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลคลื่นรูปวงรีเมื่อแอมพลิจูดลดลง กล่าวคือที่การใช้งานแอมพลิจูดต่ำๆไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนจากภาพดังกล่าวจึงเลือกไมโครเซนแนลคลื่นรูปวงรีที่ให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่เหมาะสมที่สุดในช่วงแอมพลิจูดที่พิจารณา คือแอมพลิจูด 1 mm เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม และจากรูปที่ 4.8 ทำให้ทราบจุดใช้งานของไมโครเซนแนลที่เหมาะสมที่สุดที่เลขเรย์โนลด์ที่ 700 เนื่องจากทำให้สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลดังกล่าวมากที่สุดในช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา

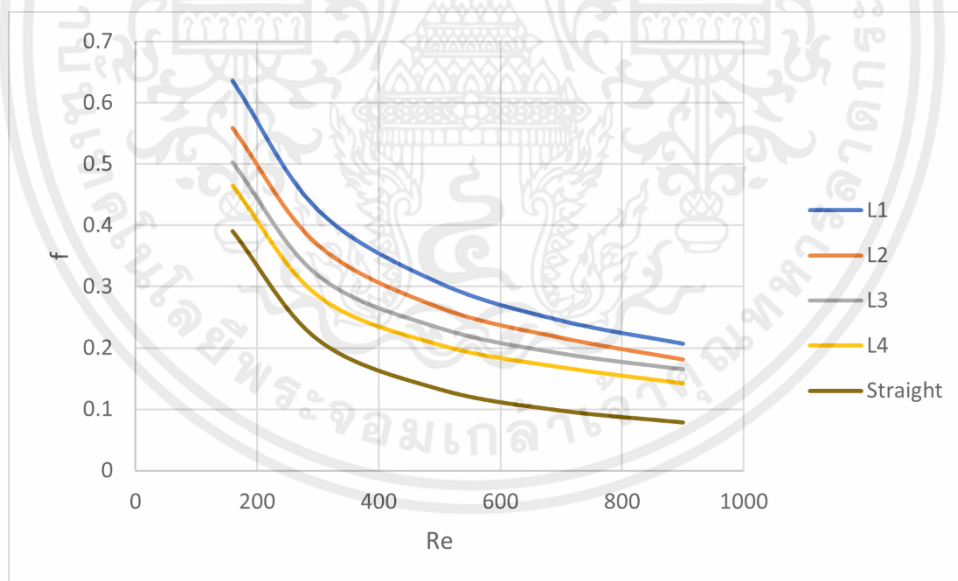
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของสมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกสำหรับช่วงเลขเรย์โนลด์ที่พิจารณา

	Elliptical $\eta$	sinusoidal $\eta$	Elliptical $\eta$ /sinusoidal $\eta$
Amp = 0.4 mm	2.23	2.21	1.009
Amp = 0.6 mm	2.39	2.34	1.0214
Amp = 0.8 mm	2.59	2.43	1.0658
Amp = 1.0 mm	2.83	2.55	1.1098

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

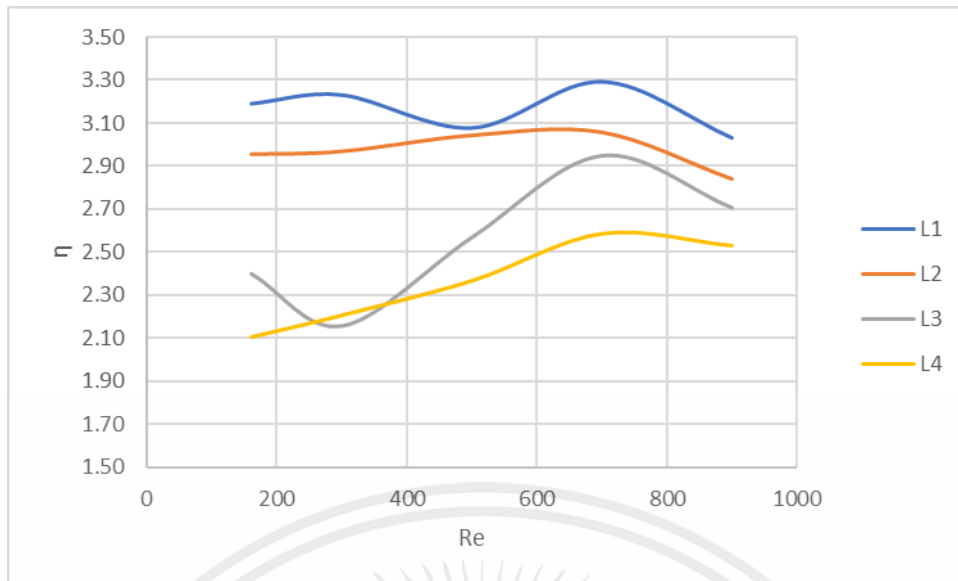


(ก) เลขนัสเซิลต์ของไมโครแชนแนลแบบคี่รูปวงรีที่แอมพลิจูด 1 mm. ที่ความยาวคลื่น L1=3 mm. ,L2=4 mm. ,L3=6 mm. ,L=8 mm.



(ข) แฟคเตอร์ความเสียดทานของไมโครแชนแนลแบบคี่รูปวงรีที่แอมพลิจูด 1 mm. ที่ความยาวคลื่น L1=3 mm. ,L2=4 mm. ,L3=6 mm. ,L=8 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโคร채นแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีแอมพลิจูด 1 mm. ที่ความยาวคลื่น L1=3 mm. ,L2=4 mm. ,L3=6 mm. ,L=8 mm.

**รูปที่ 4.9** เปรียบเทียบสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโคร채นแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีแอมพลิจูด 1 mm และความยาวคลื่นต่างๆที่เลขเรย์โนลด์ค่าเดียวกัน โดย (ก) เลขนัสเซิลต์ (ข) แฟคเตอร์ความเสียดทาน (ค) สมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิก

จากรูปที่ 4.9 ไมโคร채นแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีแอมพลิจูด 1 mm มีเลขนัสเซิลต์ ค่าแฟคเตอร์ความเสียดทาน และค่าสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกมากที่สุดที่ความยาวคลื่น L1= 3 mm. และน้อยลงไป L2 = 4 mm. , L3 = 4 mm. และ L4 = 8 mm. ตามลำดับยกเว้นในกรณีของเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ สาเหตุหนึ่งคือการผสมที่เพิ่มขึ้นในไมโคร채นแนลแบบคลื่นรูปวงรีเนื่องจากการ ก่อตัวของกระแสน้ำวนมีความรุนแรงมากกว่า ซึ่งเป็นไปในการทำงานเดียวกับบทความทางวิชาการที่ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความยาวคลื่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของไมโคร채นแนลแบบคลื่นรูปวงรีของ Sharma and Khan [7] ดังนั้นจึงได้ไมโคร채นแนลที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนที่สุดในช่วงแอมพลิจูดและความยาวคลื่นที่พิจารณาซึ่งเป็นช่วงที่ใช้งานจริงเป็นไมโคร채นแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีแอมพลิจูด 1 mm ความยาวคลื่น 3 mm และใช้งานที่เลขเรย์โนลด์ 700

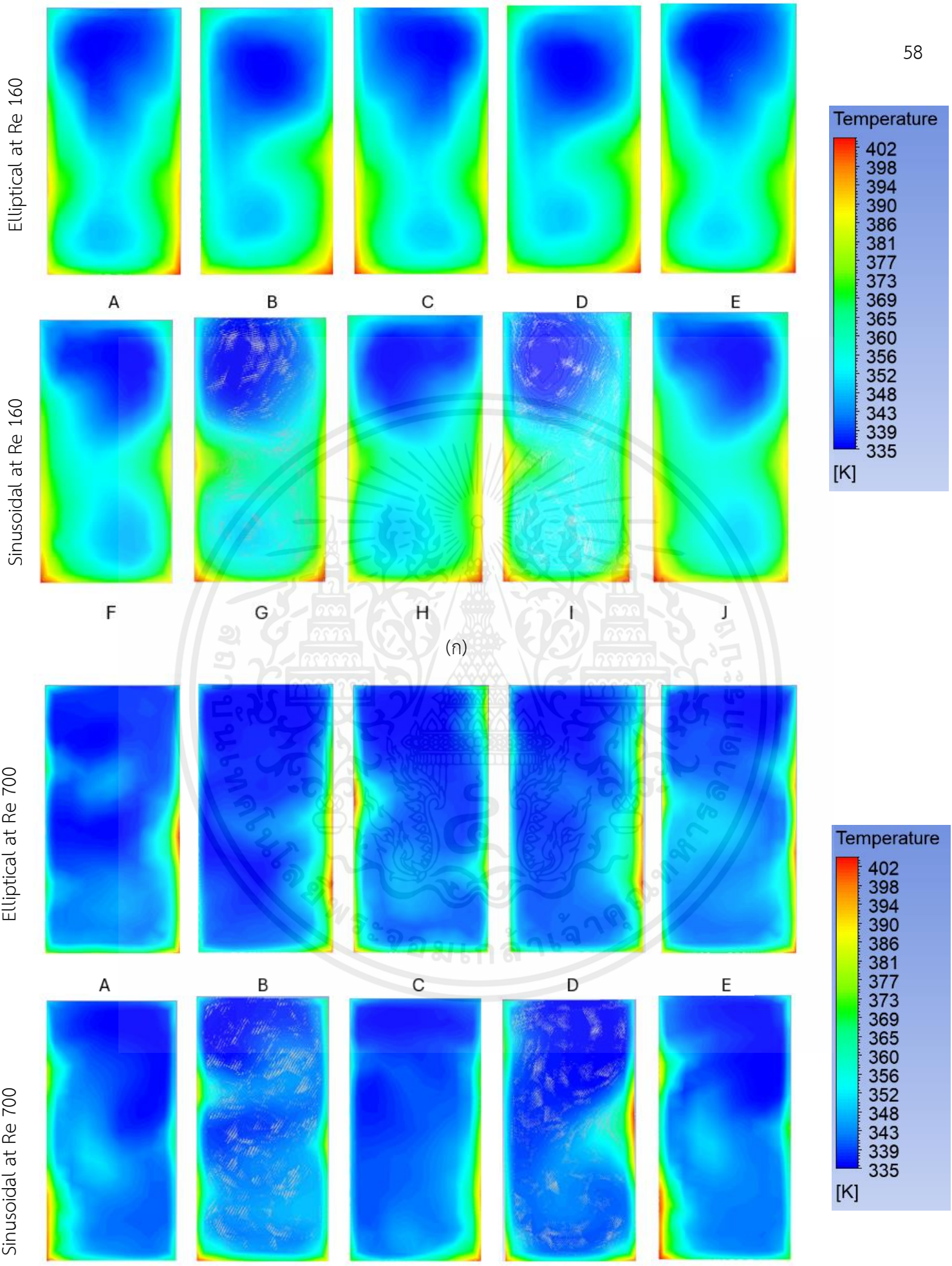
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 คอนทัวร์อุณหภูมิและสตีมีไลน์ที่หน้าตัดต่างๆ

เพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่  $Re = 160$  ( $Re$  ต่ำ) และ  $Re = 700$  ( $Re$  สูง) คอนทัวร์อุณหภูมิและสตีมีไลน์ที่หน้าตัดต่างๆในหนึ่งความยาวคลื่นที่จุดยอด A ที่  $x = 13.5$  mm, จุดเปลี่ยนเว้า B ที่  $x = 14.25$  mm, จุดต่ำสุด C ที่  $x = 15$  mm, จุดเปลี่ยนเว้า D ที่  $x = 15.75$  mm และจุดยอด E ที่  $x = 16.5$  mm โดย  $x$  คือ ระยะตามแนวเส้นทางเข้าของท่อซึ่งเริ่มที่ทางเข้าของท่อ สำหรับไมโครชาแนลแบบคลื่นรูปวงรี E2 และที่ F, G, H, I และ J ตามลำดับสำหรับแบบคลื่นรูปไซน์ S2 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 โดย จุด A-E และ F-J สามารถดูได้ดังที่แสดงในรูปที่ 4.12

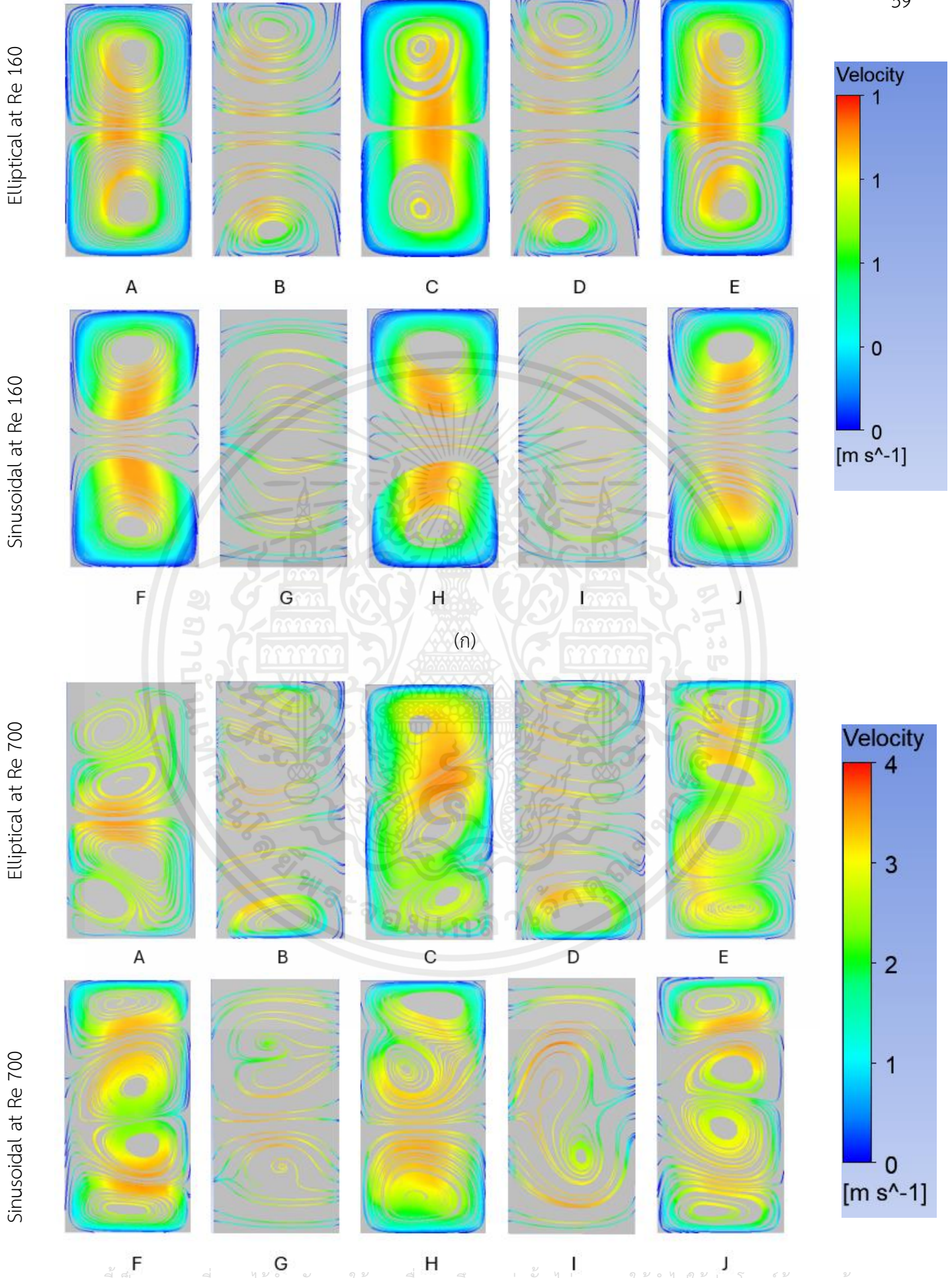
ในรูปที่ 4.10(ก) และ 4.11(ก) ของไหลในไมโครแซนแนล E2 และ S2 ไหลด้วยความเร็วตามแนวแกนที่ต่ำ (ที่  $Re$  ต่ำ) จะมีกระแสจำนวนที่เห็นได้ชัดอยู่สองกระแสก่อตัวในไมโครแซนแนล S2 และ E2 ที่ทุกหน้าตัดทั้งหมดที่พิจารณาไมโครแซนแนล S2 คอนทัวร์อุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในทิศทางการไหลจาก A ถึง E ในไมโครแซนแนล E2 และจาก F ถึง J ในไมโครแซนแนล S2 อุณหภูมิต่ำสุดจะพบได้ที่ตาของกระแสจำนวนด้านบนในทั้งไมโครแซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่นรูปไซน์ ซึ่งสมเหตุสมผลเนื่องจากผนังด้านบนของไมโครแซนแนลเป็นฉนวนในขณะที่ผนังด้านล่างได้รับความร้อน นอกจากนี้สังเกตว่าลักษณะกระแสไหลวนของทั้งไมโครแซนแนล S2 และ E2 มีความสมมาตรรอบกึ่งกลางของความสูงของแซนแนล

ในรูปที่ 4.10(ข) และ 4.11(ข) ของไหลในไมโครแซนแนล E2 และ S2 ไหลด้วยความเร็วตามแนวแกนที่สูง ( $Re$  สูง) ทำให้โมเลกุลในของไหลคลุกเคล้ากันดีขึ้น ทำให้ไม่สามารถคงกระแสจำนวนเพียงแค่สองกระแสที่หน้าตัดของไมโครแซนแนลดังที่  $Re$  ต่ำ ไปได้ ซึ่งสังเกตได้จากจำนวนกระแสจำนวนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแต่มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้สังเกตว่าลักษณะกระแสไหลวนของไมโครแซนแนล S2 มีความสมมาตรรอบกึ่งกลางของความสูงของแซนแนล ในขณะที่ไมโครแซนแนล E2 ไม่มีความสมมาตรรอบกึ่งกลางของความสูงของแซนแนล ซึ่งต่างมีสาเหตุมาจากการที่ เมื่อเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น ขนาดของความเร็วของการไหลปฐมภูมิ (ความเร็วตามแนวแกน) จะมีค่ามากขึ้น ทำให้ความหนืดของของไหลมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของการไหลของของไหลลดลงร่วมกับเงื่อนไขความเร็วที่ผนังซึ่งโค้งเป็นศูนย์ ทำให้เกิดโซนแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ไม่เสถียร (Centrifugally Unstable Zone) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความไม่เสถียรจากการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Instability) ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมดุลระหว่างแรงไล่ระดับความดันเข้าสู่ด้านใน (Inward Pressure Gradient Force) และแรงเหวี่ยงออกด้านนอก (Outward Centrifugal Force) ทำให้เกิดกระแสจำนวนดินมากกว่าหนึ่งคู่ [21]

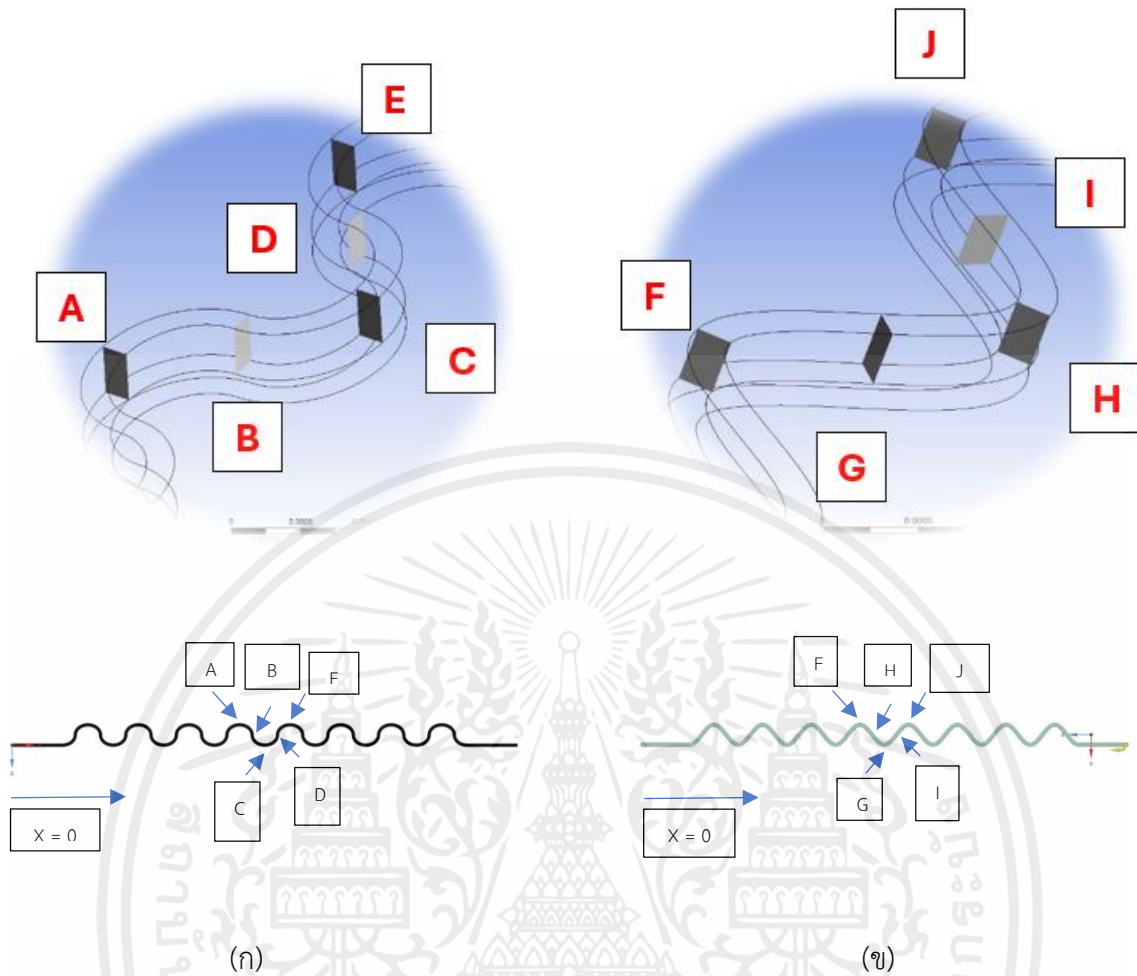


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา(ข)ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 แผนภาพอุณหภูมิไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่นรูปไซน์ โดย (ก) ที่ Re=160 และ (ข) ที่ Re=700



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 (ข)  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 4.11 แผนภาพเส้นกระแสการไหลไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีและแบบคลื่นรูปไซน์ โดย (ก) ที่ Re=160 และ (ข) ที่ Re=700



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟเส้นของไมโครเซนแนล (ก) E2 และ (ข) S2 กับตำแหน่งที่คำนวณการถ่ายเทความร้อน และแพคเตอร์แรงเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของไมโครเซนแนลที่รูปร่างต่างๆ ได้แก่ ไมโครเซนแนลแบบทอตรง ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี และไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ ที่แอมพลิจูดต่างกัน ได้แก่ 0.4 ,0.6 ,0.8 และ 1.0 mm โดยไมโครเซนแนลทำจากทองแดง หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 0.2 mm และ สูง 0.6 mm ใช้น้ำเป็นของไหลและเป็นการไหลแบบราบเรียบและมีสถานะเดียว โดยมีฟลักซ์ความร้อนที่ผนังคงที่  $= 500 \text{ kW/m}^2$  สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ผลของพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนมีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกในไมโครเซนแนลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของรูปร่างของไมโครเซนแนล ทำให้เราสามารถเปรียบเทียบการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกระหว่างไมโครเซนแนลที่มีพื้นที่ต่างกันเล็กน้อยได้
2. รัศมีความโค้งเฉลี่ยตลอดความยาวคลื่นของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีค่ามากกว่ารัศมีความโค้งเฉลี่ยของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี ทำให้การไหลทุติยภูมิของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์มีค่าน้อยกว่าไมโครเซนแนลรูปวงรี และการไหลทุติยภูมิที่มากขึ้นจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและความดันตกมากขึ้นตามไปด้วย
3. ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ตามมาด้วยไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์ และไมโครเซนแนลแบบเส้นตรง ในส่วนของแฟกเตอร์ความเสียดทานนั้น ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีให้ค่ามากที่สุด รองลงมาคือไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์และไมโครเซนแนลแบบเส้นตรงตามลำดับ
4. สมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์เข้าใกล้สมรรถนะทางเทอร์โมไฮดรอลิกของไมโครเซนแนลคลื่นรูปวงรีเมื่อแอมพลิจูดลดลง กล่าวคือที่การใช้งานแอมพลิจูดต่ำๆ ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อน
5. จากการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขทำให้เราได้ไมโครเซนแนลที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนที่ดีที่สุดในช่วงแอมพลิจูดและความยาวคลื่นที่พิจารณาซึ่งเป็นช่วงที่ใช้งานจริงเป็นไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรีที่มีแอมพลิจูด 1 mm ความยาวคลื่น 3 mm และใช้งานที่เลขเรย์โนลด์ 700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อยืนยันความถูกต้องของงานวิจัย
2. ควรศึกษาการไหลแบบสองสถานะ
3. ควรเพิ่มไมโครเซนแนลให้เป็นแบบหลายช่อง
4. ควรศึกษาของไหลชนิดอื่นที่นอกจากน้ำ เช่น สารทำความเย็น ของไหลนาโน เป็นต้น
5. ควรศึกษาไมโครเซนแนลที่หน้าตัดอื่นๆนอกจากสี่เหลี่ยมเพิ่มเติม เช่น หน้าตัดวงกลม หน้าตัวสี่เหลี่ยมคางหมู หน้าตัดสามเหลี่ยม เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] R.L. Webb, E.R.G. Eckert, **Application of rough surfaces to heat exchanger design** ,Int. J. Heat Mass Tran. 15 (9) (1972) 1647–1658.
- [2] K.W. Song, L.B. Wang, **The effectiveness of secondary flow produced by vortex generators mounted on both surfaces of the fin to enhance heat transfer in a flat tube bank fin heat exchanger**, J. Heat Tran. 135 (4) (2013).
- [3] Y. Sui ,P.S. Lee ,C.J. Teo/ **An experimental study of flow friction and heat transfer in wavy microchannels with rectangular cross section** ,International Journal of Thermal Sciences 50 (2011) 2473-2482
- [4] L. Gong ,K. Kota ,W. Tao ,Y. Joshi / **Thermal Performance of Microchannels with Wavy Walls for Electronics Cooling** ,IEEE (2010)
- [5] H.A. Mohammed ,P. Gunnasegaran ,N.H. Shuaib / **Numerical simulation of heat transfer enhancement in wavy microchannel heat sink** ,International Communications in Heat and Mass Transfer 38 (2011) 63–68
- [6] L. Lin ,J. Zhao ,G. Lu ,X. Wang ,W. Yan / **Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude** , International Journal of Thermal Sciences 118 (2017) 423-434
- [7] A. Sharma and Mohd.K. Khan / **Heat transfer and flow characteristics of varying curvature wavy microchannels** ,International Journal of Thermal Sciences 185 (2023) 108096
- [8] R. Vinoth, D. Senthil Kumar / **Channel cross section effect on heat transfer performance of oblique finned microchannel heat sink** ,International Communications in Heat and Mass Transfer 87 (2017) 270–276
- [8] FLUENT, 6 User’s Guide. Fluent Inc, Lebanon, NH, 2000
- [9] R.K. Shah, A.L. London, **Laminar Flow Forced Convection in Ducts**. Academic Press, New York, 1978
- [10] D. Liu, S.V. Garimella, **Investigation of liquid flow in microchannels**, AIAA J. Thermophys. Heat Transfer 18 (2004) 65e72
- [11] P.S. Lee, S.V. Garimella, D. Liu, **Investigation of heat transfer in rectangular microchannels**, Int. J. Heat Mass Transf. 48 (2005) 1688e1704

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Shah, R. K. and London, A. L., 1978, "Laminar flow forced convection in ducts," Supplement 1, Adv. Heat Transfer.
- [13] Stephan, K. and Preußer, P., 1979, "Wärmeübergang und maximale Wärmestromdichte beim Behältersieden binärer und ternärer Flüssigkeitsgemische," Chem.-Ing.-Tech., Vol. 51, pp. 37.
- [14] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, John Wiley and Sons, New York.
- [15] J.D. Anderson, **Computational Fluid Dynamic: The Basics with Applications**, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [16] S.V.Patankar, **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, Hemisphere, New York, 1980.
- [17] D.B. Tuckerman, R.F. Pease, **High performance heat sinking for VLSI**, IEEE Electron. Devices Lett. EDL-2 (1981) 126–129.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] K.K. Ambatipudi, M.M. Rahman, **Analysis of conjugate heat transfer in microchannel heat sinks**, Numer. Heat Transfer A 37 (2000) 711–731.
- [21] H. Fellouah, C. Castelain, A.O. El Moctar, H. Peerhossaini, **A criterion for detection of the onset of Dean instability in Newtonian fluids**, Eur. J. Mech. B Fluid 25 (4) (2006) 505–531.

# ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงความยาวทางเข้าทางอุทกพลศาสตร์ ทางความร้อน และความเร็วของของไหลที่เลขเรย์โนลด์ต่างๆ

within 30 mm		Developing	Fully Developed		
Re	L h(m)	L h(mm)	L t(m)	L t(mm)	U m(m/s)
160	0.002133333	2.133333333	0.014913941	14.91394133	0.602885193
300	0.004	4	0.02796364	27.96364	1.130409738
400	0.005333333	5.333333333	0.037284853	37.28485333	1.507212983
500	0.006666667	6.666666667	0.046606067	46.60606667	1.884016229
600	0.008	8	0.05592728	55.92728	2.260819475
700	0.009333333	9.333333333	0.065248493	65.24849333	2.637622721
800	0.010666667	10.66666667	0.074569707	74.56970667	3.014425967
900	0.012	12	0.08389092	83.89092	3.391229213
1000	0.013333333	13.33333333	0.093212133	93.21213333	3.768032458
1100	0.014666667	14.66666667	0.102533347	102.5333467	4.144835704
1200	0.016	16	0.11185456	111.85456	4.52163895

ตารางที่ 2 ตารางแสดงคุณสมบัติต่างๆของของเหลวหล่อเย็นและแข็ง

W c (m)	0.0002
H c (m)	0.0004
D h (m)	0.000266667
Pr ( )	6.99091
k f (W/m-K)	0.6
k s (W/m-K)	387.6
rho f (kg/m <sup>3</sup> )	998.2
rho s (kg/m <sup>3</sup> )	8978
c p f (J/kg-K)	4182
c p s (J/kg-K)	381
mu f (Pa-s)	0.001003
a ( )	2
L (m)	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A base (m <sup>2</sup> )	0.000018
A s (m <sup>2</sup> )	0.00003
V (m <sup>3</sup> )	2.4E-09
q w (W/m <sup>3</sup> )	500000
a 1 (mm)	0.75
b 1 (mm)	0.6
ε(mm)	0.0000015
ε/ d	0.005625
Bo ( )	0.009565169

ตารางที่ 3 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของแฟกเตอร์ความเสียหายของแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่

3.20

Shah & London	Re	160	300	500	700	900
	k	62.2293	62.2293	62.2293	62.2293	62.2293
	x <sup>+</sup>	0.703125	0.375	0.225	0.160714286	0.125
	f avg	0.38970068	0.208268303	0.125356552	0.089838692	0.070115327
	%error	1.55887777	0.450225761	4.871554082	5.000431261	7.001433043
62.2/Re	f avg	0.38875	0.207333333	0.1244	0.088857143	0.069111111
	%error	1.318142002	0.903205922	5.677945483	6.160305421	-8.55621185
Colebrook	f avg	0.135976981	0.102863185	0.084021028	0.07436015	0.068255913
	%error	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4 แสดงการตรวจสอบความถูกต้องของเลขนีสเซลต์ของแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.19

Shah & London	Re	160	300	500	700	900
	Re*Pr*d/L	9.942627556	18.64242667	31.07071111	43.49899556	55.92728
	Nu avg	5.08185771	5.709983205	6.607305342	6.868501322	7.46867353
	%error	2.21E+01	3.90E+00	1.80E+00	2.66E+00	5.39E-01
Stephan	Nu avg	5.306242882	5.99703527	6.798591717	7.466248828	8.047201841
	%error	2.54E+01	8.50E+00	4.57E+00	1.05E+01	7.69E+00
Dittus-Boelter	Nu avg	2.902934967	4.799967803	7.222995161	9.454090438	11.55940095
	%error	-3.64E+01	-1.43E+01	1.02E+01	2.93E+01	3.57E+01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ตารางแสดงการหา  $Nu$  เฉลี่ยตลอดความยาวที่  $Re$  ต่างๆของไมโครแชนแนลรูปร่างต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.3 (ก)

Straight Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
m dot (kg/s)	4.79E-05	9.02E-05	0.000150129	0.00021082	0.000270712
A s (m <sup>2</sup> )	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
T w	319.93	313.5186	311.0529	310.83	3.10E+02
T m	304.995	301.10595	299.155965	298.22885	297.68185
T in	295.037	295.0143	295.00656	295.0039	295.0027
T out	314.953	307.1976	303.30537	301.4538	300.361
Nu avg	3.96E+00	5.49E+00	6.49E+00	6.685508613	7.43E+00
Sinusoidal-Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
m dot (kg/s)	4.79E-05	9.02E-05	0.000150129	0.00021082	0.000270712
A s (m <sup>2</sup> )	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
T w	313.08	305.97	302.55	301.22	300.1
T m	305.12356	300.44762	298.290855	297.38343	296.822785
T in	295.0301	295.01188	295.00575	295.00359	295.00256
T out	315.21702	305.88336	301.57596	299.76327	298.64301
Nu avg	7.53E+00	1.10E+01	14.34836912	16.204151	1.86E+01
%increase	9.03E+01	1.01E+02	1.21E+02	1.42E+02	1.51E+02
% increase avg	1.21E+02				
Elliptical-Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
m dot (kg/s)	4.79E-05	9.02E-05	0.000150129	0.00021082	0.000270712
A s (m <sup>2</sup> )	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
T w	312.46	305.83	302.1332	300.824	300.1101
T m	305.294305	300.50952	298.321685	297.357285	296.84045
T in	295.05955	295.03696	295.02716	295.02271	295.02029
T out	315.52906	305.98208	301.61621	299.69186	298.66061
Nu avg	8.48E+00	1.15E+01	16.07943873	17.59184295	18.67350051
%increase	1.14E+02	1.10E+02	1.48E+02	1.63E+02	1.51E+02
% increase avg	1.37E+02				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ตารางแสดงการหา  $f$  เฉลี่ยตลอดความยาวที่  $Re$  ต่างๆของไมโครแชนแนลรูปร่างต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.3 (ข)

Straight Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
delta p (Pa)	7829.19388	15010.18231	26200.77353	36848.5113	48445.88978
f avg	0.383625723	0.20920598	0.131463364	0.094331014	0.075024404
Sinusoidal-Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
delta p (Pa)	11217.54464	25282.41145	51542.82386	82680.47269	117991.9149
f avg	0.549652843	0.352376244	0.258618053	0.211659374	0.182724957
%increase	4.33E+01	6.84E+01	9.67E+01	1.24E+02	1.44E+02
% increase avg	9.53E+01				
Elliptical-Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
delta p (Pa)	12970.82806	30607.23768	61248.56008	95419.31898	133281.1825
f avg	0.63556266	0.426591565	0.307316948	0.244270415	0.206402263
%increase	6.57E+01	1.04E+02	1.34E+02	1.59E+02	1.75E+02
% increase avg	1.27E+02				

ตารางที่ 7 ตารางแสดงการหาสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิกเฉลี่ยตลอดความยาวที่  $Re$  ต่างๆของไมโครแชนแนลรูปร่างต่างๆ

Sinusoidal-Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
$\eta$	1.69E+00	1.69E+00	1.76E+00	1.85E+00	1.86E+00
Elliptical-Wavy Microchannel					
Re	160	300	500	700	900
$\eta$	1.81E+00	1.65E+00	1.87E+00	1.92E+00	1.79E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 ตารางแสดงอิทธิพลของพื้นที่ของไมโครเซนแนลต่อเลขนัสเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.1(ก)

Elliptical @ 8 mm <sup>2</sup> (100%)						
Re	160	300	500	700	900	
m dot (kg/s)	4.79E-05	9.02E-05	0.000150129	0.00021063	0.000270792	
A s (m <sup>2</sup> )	8.01479E-06	8.01479E-06	8.01479E-06	8.01479E-06	8.01479E-06	
T w	310.768885	304.4376	301.747405	300.71741	299.9730025	
T m	305.744105	300.824295	298.50846	297.569525	296.95823	
T in	295.03076	295.01239	295.00613	295.00391	295.00284	
T out	316.45745	306.6362	302.01079	300.13514	298.91362	
Nu avg	4.74E+01	6.73E+01	75.29366932	79.62187957	81.46175518	
avg	7.02E+01					
%inc	2.01E+01					
Sinusoidal @ 9 mm <sup>2</sup> (112.5%)						
	160	300	500	700	900	
	4.81E-05	9.03E-05	0.00015045	0.00021063	0.00027081	
	9.06E-06	9.06E-06	9.06E-06	9.06E-06	9.06E-06	
	314.4837075	306.0822975	302.6917575	301.240385	300.416865	
	307.215665	301.479905	298.934685	297.721705	297.19767	
	295.03335	295.0129	295.00626	295.00398	295.00288	
	319.39798	307.94691	302.86311	300.43943	299.39246	
	3.31E+01	5.20E+01	6.45E+01	6.68E+01	7.58E+01	
	5.84E+01					
Sinusoidal @ 10 mm <sup>2</sup> (125%)						
	160	300	500	700	900	
	4.81E-05	9.03E-05	0.00015045	0.00021063	0.00027081	
	1.04E-05	1.04E-05	1.04E-05	1.04E-05	1.04E-05	
	316.041125	306.9099275	303.180965	301.6028475	300.6808525	
	308.81902	302.334545	299.393305	298.09199	297.454	
	295.03336	295.01291	295.00626	295.00398	295.00288	
	322.60468	309.65618	303.78035	301.18	299.90512	
	3.30E+01	5.18E+01	6.25E+01	6.64E+01	7.38E+01	
	5.75E+01					
	-1.62E+00					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 ตารางแสดงอิทธิพลของพื้นที่ของไมโครเซนแนลต่อแฟคเตอร์ความเสียหาย ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.1 (ข)

Re	160	300	500	700	900
delta p (Pa)	12970.82806	30607.23768	61248.56008	95419.31898	133281.1825
f avg	0.63556266	0.426591565	0.307316948	0.244270415	0.206402263
avg	3.64E-01				
%inc	3.33E+01				
	160	300	500	700	900
	12717.05352	26520.93013	51428.7004	82122.36324	114370.229
	0.519273219	0.308031856	0.215037861	0.175192193	0.147596943
	2.73E-01				
	160	300	500	700	900
	14518.35769	30265.64578	59168.46321	93688.3141	130598.7551
	0.508136192	0.301307566	0.212057131	0.199865915	0.144462997
	2.73E-01				
	5.11E-02				

ตารางที่ 10 แสดงค่า  $De/Re$  ที่ตำแหน่ง  $x=3$  ถึง  $x=6$  mm ของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปไซน์  $A = 0.6$  mm  $\lambda = 3$  mm ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.2 (ก)

x	De/Re
0	0.592385
0.0625	0.578217151
0.125	0.539912908
0.1875	0.487135161
0.25	0.429525466
0.3125	0.373483487
0.375	0.321947484
0.4375	0.275451968
0.5	0.233129182
0.5625	0.193204358
0.625	0.152804792
0.6875	0.105989357
0.75	2.27766E-09
0.8125	0.105989357
0.875	0.152804792
0.9375	0.193204358

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	0.233129182
1.0625	0.275451968
1.125	0.321947484
1.1875	0.373483487
1.25	0.429525466
1.3125	0.487135161
1.375	0.539912908
1.4375	0.578217151
1.5	0.592385
1.5625	0.578217151
1.625	0.539912908
1.6875	0.487135161
1.75	0.429525466
1.8125	0.373483487
1.875	0.321947484
1.9375	0.275451968
2	0.233129182
2.0625	0.193204358
2.125	0.152804792
2.1875	0.105989357
2.25	3.94502E-09
2.3125	0.105989357
2.375	0.152804792
2.4375	0.193204358
2.5	0.233129182
2.5625	0.275451968
2.625	0.321947484
2.6875	0.373483487
2.75	0.429525466
2.8125	0.487135161
2.875	0.539912908
2.9375	0.578217151
3	0.592385
avg	0.337558373



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 แสดงค่า  $De/Re$  ที่ตำแหน่ง  $x=3$  ถึง  $x=6$  mm ของไมโครเซนแนลแบบคลื่นรูปวงรี  $A = 0.6$  mm

$\lambda = 3$  mm ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.2 (ข)

x	Equation	x substituted	De/Re
0	1	0.75	0.37712414
0.0625	1	0.8125	0.377832798
0.125	1	0.875	0.379977548
0.1875	1	0.9375	0.38361604
0.25	1	1	0.388848929
0.3125	1	1.0625	0.395827419
0.375	1	1.125	0.404765313
0.4375	1	1.1875	0.415957528
0.5	1	1.25	0.429808369
0.5625	1	1.3125	0.446875262
0.625	1	1.375	0.467938076
0.6875	1	1.4375	0.494112878
0.75	1	1.5	
0.8125	2	0.0625	0.494112878
0.875	2	0.125	0.467938076
0.9375	2	0.1875	0.446875262
1	2	0.25	0.429808369
1.0625	2	0.3125	0.415957528
1.125	2	0.375	0.404765313
1.1875	2	0.4375	0.395827419
1.25	2	0.5	0.388848929
1.3125	2	0.5625	0.38361604
1.375	2	0.625	0.379977548
1.4375	2	0.6875	0.377832798
1.5	2	0.75	0.37712414
1.5625	2	0.8125	0.377832798
1.625	2	0.875	0.379977548
1.6875	2	0.9375	0.38361604
1.75	2	1	0.388848929
1.8125	2	1.0625	0.395827419
1.875	2	1.125	0.404765313
1.9375	2	1.1875	0.415957528
2	2	1.25	0.429808369

สมการที่ 1 คือ  $y = (0.411954 * \text{SQRT}(1/((2*(3 - 4*x)^2)/(25*(3 - 2*x)*x) + 1)^{(3/2)}))/\text{ABS}(x*(2*x - 3))^{(3/4)}$

สมการที่ 2 คือ  $y = (0.411954 * \text{SQRT}(1/(1 - (2*(4*x - 3)^2)/(25*x*(2*x - 3)))^{(3/2)}))/\text{ABS}(x*(2*x - 3))^{(3/4)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.0625	2	1.3125	0.446875262
2.125	2	1.375	0.467938076
2.1875	2	1.4375	0.494112878
2.25	2	1.5	
2.3125	1	0.0625	0.494112878
2.375	1	0.125	0.467938076
2.4375	1	0.1875	0.446875262
2.5	1	0.25	0.429808369
2.5625	1	0.3125	0.415957528
2.625	1	0.375	0.404765313
2.6875	1	0.4375	0.395827419
2.75	1	0.5	0.388848929
2.8125	1	0.5625	0.38361604
2.875	1	0.625	0.379977548
2.9375	1	0.6875	0.377832798
3	1	0.75	0.37712414
		avg	0.414332193
		%inc	22.74386483

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 ข้อมูลผลของแอมพลิจูดสำหรับการนำไปพลอตสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิก ซึ่งนำไปพลอตได้เป็นรูปที่

4.4 และ 4.6

Elliptical					
Amp = 0.4 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	11.6	15.12	18.34	19.23	19.79
f	0.5709	0.383	0.2843	0.2305	0.1963

Amp = 0.6 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	12.73	16.6	19.82	21.33	22.43
f	0.6366	0.4266	0.3075	0.2457	0.2087

Amp = 0.8 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	14.03	18.7	22.21	23.98	25.14
f	0.7104	0.4677	0.3371	0.2684	0.2267

Amp = 1.0 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	15.19	20.47	24.89	26.87	28.37
f	0.7641	0.4923	0.3522	0.2786	0.2334

Sinusoidal					
Amp = 0.4 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	10.38	14.45	17.34	18.36	19.15
f	0.5114	0.3269	0.2421	0.1958	0.1699

Amp = 0.6 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	12.02	16.08	19.2	20.12	20.99
f	0.588	0.3848	0.2798	0.2258	0.1911

Amp = 0.8 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	13.05	17.1	20.58	21.35	22.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f	0.662	0.4247	0.3073	0.2484	0.2098
---	-------	--------	--------	--------	--------

Amp = 1.0 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	14.07	18.48	22.6	23.27	24.56
f	0.7447	0.473	0.3429	0.2715	0.2304

ตารางที่ 13 ข้อมูลผลของความยาวคลื่นสำหรับการนำไปพลอตสมรรถนะเทอร์โมไฮดรอลิก ซึ่งนำไปพลอตเป็นรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข)

Elliptical					
Lamb = 3 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	12.63	17.72	19.97	22.01	22.52
f	0.6355	0.4251	0.3055	0.2444	0.2066

Lamb = 4 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	11.7	16.29	19.74	20.44	21.09
f	0.5589	0.3683	0.266	0.2167	0.1813

Lamb = 6 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	9.49	11.83	16.66	19.71	20.09
f	0.5024	0.3181	0.2322	0.1907	0.1648

Lamb = 8 mm					
Re	160	300	500	700	900
Nu	8.34	12.12	15.37	17.31	18.81
f	0.4646	0.2854	0.2053	0.1688	0.1425

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้