

การศึกษาผลของความโค้งที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน  
ในท่ออะลูมิเนียมยัดหยุ่น

นายธีระชาติ พรพิบูลย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-603-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**CURVATURE EFFECT STUDY ON HEAT TRANSFER AND FRICTIONAL  
RESISTANCE IN ALUMINIUM FLEXIBLE DUCTS**

**Mr. Teerachart Pornpibul**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Graduate School  
Chulalongkorn University  
Academic Year 1996  
ISBN 974-635-603-8**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของความโค้งที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานใน  
ท่ออะลูมิเนียมยัดหยุ่น  
โดย นายธีระชาติ พรพิบูลย์  
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูรากรณ์


---

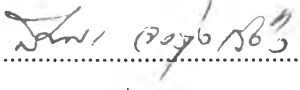
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูรากรณ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จรุงเรือง)



# พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ธีระชาติ พรพิบลัย, การศึกษาผลของความโค้งที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่น (CURVATURE EFFECT STUDY ON HEAT TRANSFER AND FRICTIONAL RESISTANCE IN ALUMINIUM FLEXIBEL DUCTS)

อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑราภรณ์ ; 180 หน้า. ISBN 974-635-603-8

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อ วิเคราะห์ผลจากความโค้งของท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่น ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน โดยพลังงานความร้อนที่ไหลแก่ท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นเป็นแบบคาความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ ในช่วงการไหลของอากาศแบบปั่นป่วน ที่เรย์โนลด์สมีเบอร์ตั้งแต่ 30,000 ถึง 120,000 รวมถึงพิจารณาผลของความหยาบและผลกระทบที่ปากทางเข้า

กลมตัวอย่างของท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นที่ใช้ทดสอบมีทั้งหมด 4 กลมคือ ท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นวางตัวในแนวตรง ความยาว 0.5 เมตร ท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นวางตัวในแนวตรง ความยาว 1 เมตร ท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นวางตัวในแนวโค้ง มม 90 ความยาว 0.5 เมตร และท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นวางตัวในแนวโค้ง มม 90 ความยาว 1 เมตร

จากผลการวิจัยพบว่า

1. ในท่อที่วางตัวแนวตรง ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นมีความยาวลดลง โดยพิจารณาที่ระยะแอมปริจูดและอัตราการไหลเดียวกัน
2. ในท่อที่วางตัวแนวโค้ง ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นมีรัศมีมีความโค้งลดลง โดยพิจารณาที่ระยะแอมปริจูดและอัตราการไหลเดียวกัน
3. ในท่อที่วางตัวแนวโค้งและแนวตรง ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะแอมปริจูดของท่อมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาที่ความยาวท่อและอัตราการไหลเดียวกัน
4. ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของท่อที่วางตัวในแนวโค้ง 90 จะสูงกว่าท่อที่วางตัวในแนวตรงประมาณ 175% เมื่อพิจารณาที่ ความยาวท่อ ระยะแอมปริจูด และอัตราการไหลเดียวกัน
5. ในท่อที่วางตัวแนวตรงเมื่อความยาวท่อมีค่าสูงขึ้น ค่าความดันเสถียรมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระยะแอมปริจูด และอัตราการไหลเดียวกัน
6. ในท่อที่วางตัวแนวโค้งเมื่อรัศมีมีความโค้งมีค่าสูงขึ้น ค่าความดันเสถียรมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อพิจารณาที่ระยะแอมปริจูด และอัตราการไหลเดียวกัน
7. ในท่อที่วางตัวแนวโค้งและแนวตรงเมื่อระยะแอมปริจูดเพิ่มขึ้น ค่าความดันเสถียรมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อพิจารณาที่ความยาวท่อและอัตราการไหลเดียวกัน
8. ค่าความดันในท่อโค้ง มม 90 มีค่าสูงกว่าท่อที่วางตัวในแนวตรงประมาณ 250% เมื่อพิจารณาที่ระยะแอมปริจูด ความยาวท่อ และอัตราการไหลเดียวกัน

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....  
สาขาวิชา .....  
ปีการศึกษา ..... 2539 .....

ลายมือชื่อนิสิต *ธีระชาติ พรพิบลัย* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *เชิดพันธ์ วิฑราภรณ์* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม .....

## C616018: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FLEXIBLE DUCT/HEAT TRANSFER/CURVATURE EFFECT/FRICTION/  
FLUID FLOW

TEERACHART PORNPIBUL : CURVATURE EFFECT STUDY ON HEAT TRANSFER AND  
FRICTIONAL RESISTANCE IN ALUMINIUM FLEXIBLE DUCTS.

THESIS ADVISOR : CHIRDPUN VITOORAPORN ,Ph.D. 180 pp. ISBN 974-635-603-8.

The objective of this research is to analyze the impact of curvature of the aluminum flexible duct on heat transfer and friction loss. The aluminum flexible duct was heated through its surface by the constant heat flux method in the air turbulence region ( $30000 \leq Re \leq 120000$ ). The study also included the investigation of the effect of roughness of aluminum flexible duct as well as heat transfer and frictional resistance at the entrance.

Samples used for this research were consisted of aluminum flexible ducts which can be classified into four groups as follows : (1) straight duct with 0.5 m in length ; (2) straight duct with 1 m in length ; (3) 90 - degree curve duct with 0.5 m in length ; and (4) 90 - degree curve duct with 1 m in length .

Results from the study can be summarized as follows ;

1. The average Nusselt numbers of straight ducts tend to increase as the duct lengths decrease at the same ranges of amplitude and the flow rates .
2. The average Nusselt numbers of curve ducts tend to increase as the radius of the duct curvature decreases at the same ranges of amplitude and the flow rates.
3. The average Nusselt numbers of both curve and straight ducts tend to increase as the amplitude increases at the same ranges of duct lengths and the flow rates.
4. The average Nusselt numbers of 90 - degree curve ducts are approximately 175% higher than those of the straight duct at the same ranges of amplitude and the flow rates .
5. The pressure drops of straight ducts tend to increase as the duct lengths increase at the same ranges of amplitude and the flow rates.
6. The pressure drop of curve ducts tend to increase as the radius of the duct curvature increases at the same ranges of amplitude and the flow rates.
7. The pressure drops of both curve and straight ducts tend to increase as the amplitude increases at the same ranges of the duct lengths and the flow rates.
8. The pressure drops of the 90 - degree curve ducts are approximately 250% higher than those of the straight ducts at the same ranges of the amplitude , the duct lengths , and the flow rates.

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา.....

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต..... ชัยวัฒน์ พรหมวงศ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ชัยวัฒน์ พรหมวงศ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิทยากรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ขงเจริญ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศรี จรุงเรือง ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา รวมทั้งบุคคลที่ปรากฏตามเอกสารอ้างอิงที่ผู้วิจัยใช้อ้างอิงทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณ บริษัท แอร์โค จำกัด ที่ได้มอบเครื่องปรับอากาศ เพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์การทดลอง

ขอขอบพระคุณ คุณภานุ ปทุมทรัพย์ , คุณวีระยุทธ ทองส่งแสง และเพื่อนพนักงานการสื่อสารแห่งประเทศไทย ที่ได้อนุเคราะห์ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ในการออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์การทดลอง จนสำเร็จด้วยดี

ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูแด่บิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีระชาติ พรพิบูลย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฐ
รายการสัญลักษณ์.....	ถ

## บทที่

1 บทนำ .....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
งานวิจัยของ H.Ito.....	4
งานวิจัยของ J.E.O'Brien.....	8
งานวิจัยของ กฤตย์ ศรีนภาสวัสดิ์.....	10
3 ทฤษฎี.....	12
การไหลภายในท่อ.....	12
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	14
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	16
องค์ประกอบที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	18
สมมูลของพลังงาน.....	20
การไหลแบบปั่นป่วน.....	23
ความสัมพันธ์ของทฤษฎีกับท่ออะลูมิเนียมขัดหยาบ.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ความเสียหายในระบบจ่ายลม.....	26
การวิเคราะห์ทางมิติ.....	26
4 อุปกรณ์การทดลอง.....	29
ลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์การทดลอง.....	29
ท่อทดสอบ.....	30
ส่วนทดสอบ.....	32
กล่องทางเข้า.....	34
ส่วนทางออก.....	34
ออริฟิซมิเตอร์.....	36
อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ.....	36
อุปกรณ์อื่นๆ.....	38
ขั้นตอนการทดลอง.....	38
5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	42
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	42
การวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	43
การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	62
6 การนำผลการวิจัยมาประยุกต์ใช้งานและข้อเสนอแนะ.....	71
ฉนวนท่อลมชนิดท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้ม.....	71
การคำนวณหาค่าความดันลดจากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัย.....	83
ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป.....	86
รายการอ้างอิง .....	87
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	91
ภาคผนวก ค.....	140



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ง. ....	173
ภาคผนวก จ. ....	176
ประวัติผู้เขียน .....	180

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะท่อโค้งที่วิจัย โดย H.Ito.....	4
4.1 เงื่อนไขควบคุมอุณหภูมิที่เข้าและออกของอากาศในท่อทดสอบ.....	32
5.1 ตัวแปรไร้มิติที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน.....	43
6.1 คุณสมบัติของฉนวนชนิดใยแก้ว.....	78
6.2 ผลจากรูปแบบการวางตัวของท่อที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนจากกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี.....	82
6.3 ผลจากรูปแบบการวางตัวของท่อที่มีต่อความดันลดที่เกิดขึ้นจากกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี.....	86

## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงมิติของความโค้งที่ $l_0$ พิจารณา.....	5
2.2 ความดันลดในท่อโค้ง.....	6
2.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมกับมุมความโค้ง.....	7
2.4 ลักษณะของท่อลูกฟูกและส่วนให้ความร้อนในงานวิจัยของ J.E.O'Brien.....	9
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จากงานวิจัยของ J.E.O'Brien .....	10
2.6 แสดงลักษณะท่อลูกฟูกที่ใช้วิจัย โดย กฤตย์ ศรีนภาสวัสดิ์.....	11
3.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั้นขอบเขต.....	12
3.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั้นขอบเขตความร้อน.....	13
3.3 ตัวแปรไร้มิติของผลต่างของอุณหภูมิ ในช่วงรูปแบบของอุณหภูมิดังรูปแล้ว.....	14
3.4 ปริมาตรควบคุมของการไหล.....	15
3.5 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงปากทางเข้า.....	17
3.6 การเกิดชั้นขอบเขตความเร็วและความร้อนของอากาศ( $Pr \approx 0.71$ ) ในบริเวณปากทางเข้า (Entrance region).....	19
3.7 ปริมาตรควบคุมของท่อที่มีการให้ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ .....	21
3.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวท่อและอุณหภูมิของของไหล การให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ผิวคงที่.....	23
3.9 แสดงพฤติกรรมการไหล รูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิ ในการไหลแบบปั่นป่วน (ก) แสดงพฤติกรรมการไหล (ข) แสดงถึงอิทธิพลการไหลแบบปั่นป่วนที่มีต่อรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิ .....	24
3.10 แสดงท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มพร้อมมิติที่สำคัญของท่อ.....	27
4.1 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ทดลอง.....	30
4.2 สัญลักษณ์แสดงรูปแบบการวางตัวของท่อและเงื่อนไขอุณหภูมิในการทดลอง (ก) สำหรับท่อวางตัวแนวตรง (ข) สำหรับท่อวางตัวแนวโค้ง.....	33
4.3 แสดงลักษณะภายในของส่วนทดสอบ และอุปกรณ์ที่ติดตั้ง.....	34
4.4 แสดงลักษณะภายในของกล่องทางเข้าและอุปกรณ์ที่ติดตั้ง.....	35

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงการติดตั้งคู่ควบอุณหภูมิภายในส่วนทางออก.....	35
4.6 แสดงลักษณะของออร์พีซมิเตอร์ ณ.ตำแหน่งทางออก.....	36
4.7 แสดงเทอร์โมมิเตอร์อินดิเคเตอร์แบบดิจิตอล.....	37
4.8 แสดงमानอมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	
(ก) मानอมิเตอร์ชนิดเอียง (ข) मानอมิเตอร์ชนิดหลอดแก้วด้วย.....	39
4.9 แสดงวงจรการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่วัดความร้อน.....	40
5.1 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวท่อ ที่ $Re=36148.3$ (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 24ข).....	44
5.2 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของค่า $L/D$ (ในท่อวางตัวแนวตรง) และ $R/D$ (ในท่อวางตัวแนวโค้ง) ที่มีต่อ $Nu$ ที่ $Re$ ต่างๆ โดยมี $L/D = 9.524, 4.762$ และ $R/D = 6.063, 3.028$ พิจารณาที่ $a/D$ อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 2ข, 14ข, 26ข และ 38ข ตามลำดับ).....	45
5.3 แสดงอิทธิพลของค่า $a/D$ ที่มีต่อค่า $Nu$ ที่ $Re$ ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย $a/D$ เท่ากับ 0.0214, 0.0976, 0.111 พิจารณาที่ค่า $L/D$ อุณหภูมิอากาศเข้า และ อุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 16ข, 17ข และ 18ข ตามลำดับ).....	46
5.4 แสดงอิทธิพลของค่า $Pr$ ที่มีต่อค่า $Nu$ ที่ $Re$ ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย $Pr$ เท่ากับ 0.7122, 0.712, 0.7097, 0.7095 โดยพิจารณาที่ $L/D$ $a/D$ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข, 4ข, 7ข, 10ข ตามลำดับ).....	52
5.5 แสดงอิทธิพลของความโค้งที่มีต่อค่า $Nu$ ที่ $Re$ ต่างๆ โดยพิจารณาเปรียบเทียบ ระหว่างท่อวางตัวแนวตรงความยาว 0.5 เมตร กับท่อวางตัวแนวโค้งความยาว 0.5 เมตร ซึ่งมีค่า $a/D$ อุณหภูมิอากาศเข้า และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 17ข และ 41ข ตามลำดับ).....	53

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 แสดงอิทธิพลของ $a/D$ ที่มีต่อ $f$ ที่ $Re$ ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย $a/D$ เท่ากับ 0.0214 , 0.0976 , 0.111 ซึ่งมีค่า $L/D$ อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน(ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 10ข , 11ข , 12ข ตามลำดับ).....	54
5.7 แสดงอิทธิพลของค่า $a/D$ ที่มีผลต่อ $K$ ที่ $Re$ ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย $a/D$ เท่ากับ 0.0513 , 0.0976 , 0.111 โดยพิจารณาที่ค่า $R/D$ อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และ อุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 34ข , 35ข , 36ข ตามลำดับ ).....	55
5.8 แสดงอิทธิพลของ $R/D$ ที่มีต่อ $\Delta p$ ที่อัตราการไหล ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย $R/D$ เท่ากับ 6.063 และ 3.028 โดยพิจารณาที่ $a/D$ อุณหภูมิอากาศเข้าท่อ และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 25ข และ 37ข ตามลำดับ).....	56
5.9 แสดงอิทธิพลของความโค้งที่มีต่อความดันลดที่อัตราการไหลต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างท่อวางตัวแนวโค้งและท่อวางตัวแนวตรง ซึ่งมีค่า $a/D$ ความยาวท่อ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 38ข และ 14ข ตามลำดับ).....	61
5.10 แสดงถึงอิทธิพลของค่า $R/D$ ที่มีต่อ $K$ ที่ $Re$ ต่างๆ โดยพิจารณาเปรียบเทียบ ระหว่าง $R/D$ เท่ากับ 3.028 และ 6.063 โดยที่มีค่า $a/D$ , อุณหภูมิของอากาศเข้าและออกจากท่อ เดียวกัน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 37ข และ 25ข ตามลำดับ ).....	62
5.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งรวมซึ่งได้จากสมการ ทางเอมไพริกัล (สมการที่ 2.5) จากงานวิจัยของ H.Ito กับ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ความโค้ง ได้จากท่ออะลูมิเนียมยัดหยุ่นวางตัวแนวโค้ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความยาว 1 เมตร ระยะพิท 23 มิลลิเมตร อุณหภูมิอากาศเข้า 16 °C และ อุณหภูมิอากาศออก 18.5 °C (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 25ข).....	63

## สารบัญรูปลภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แสดงการเปรียบเทียบสมการทางเอมไพริกัลจากผลการวิจัยของ J.E.O.'Brien และกฤษต์ ศรีนภาสวัสดิ์ กับผลการทดลอง ท่ออะลูมิเนียมยึดหุ่นวางตัวแนวตรง ความยาว 0.5 เมตร(L/D=4.76) ระยะพิท 10 มิลลิเมตร (a/D=0.111) อุณหภูมิอากาศเข้า 16 °C และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ 18.5 °C (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 15ข).....	65
5.13 แสดงแผนภูมิค่าความดันลดต่อความยาวท่อ 1 เมตร ที่อัตราการไหล ความเร็ว และขนาดท่อต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้นจากผลการทดลองท่อวางตัวแนวตรงความยาว 1 เมตร ระยะพิท 25 มิลลิเมตร (ยึดตัวสูงสุด มีระยะแอมปริจูดเท่ากับ 2.245 มิลลิเมตร) อุณหภูมิอากาศเข้า 16 °C และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ 18.5 °C ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 17.25 °C (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข).....	67
5.14 แสดงแผนภูมิค่าความดันลด ที่อัตราการไหล ความเร็ว และขนาดท่อต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้นจาก ผลการทดลองท่อวางตัวแนวโค้ง 90 °อัตราส่วนรัศมีมีความโค้ง ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 6.063 ระยะพิท 23 มิลลิเมตร(ยึดตัวจนสุด) อุณหภูมิอากาศเข้า 16°C และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ 18.5°C (ข้อมูลจาก ภาคผนวก ข ตารางที่ 25ข ).....	68
5.15 แสดงแผนภูมิค่าความดันลด ที่อัตราการไหล ความเร็ว และขนาดท่อต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้นจากผลการทดลองท่อวางตัวแนวโค้ง 90 °อัตราส่วนรัศมีมีความโค้ง ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 3.028 ระยะพิท 23 มิลลิเมตร(ยึดตัวจนสุด) อุณหภูมิอากาศเข้า 16°C และอุณหภูมิอากาศออกจากท่อ 18.5°C (ข้อมูลจาก ภาคผนวก ข ตารางที่ 37ข).....	69
5.16 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความดันลดต่อความยาวท่อ 1 เมตร ที่อัตราการไหล ความเร็ว และขนาดท่อต่างๆ ระหว่างค่าความดันลดที่ความยาวท่อ 1 เมตร ระยะพิท 25 มิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ย 17.25 °C ( ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข ) กับแผนภูมิที่แนะนำโดยบริษัท ตะวันออกไปตีเมอร์ อุตสาหกรรม จำกัด.....	70
6.1 แสดงพฤติกรรมการแจกแจงอุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อนแบบผสม.....	71

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 ฉนวนหุ้มท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้ม.....	72
6.3 แสดงแผนภูมิค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ที่ขนาดท่อ และ อัตราการไหลต่างๆ สำหรับ ท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มวงตัวในแนวตรง อัตราส่วนความยาวท่อต่อ เส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับ 9.254 ระยะพิท 25 มิลลิเมตร (Fully extended) ได้สร้างจาก สมการทางเอมไพริคัลที่ได้จากการทดลองที่ s1P25dT2.5[C] (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 1ข).....	74
6.4 แสดงแผนภูมิค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ที่ขนาดท่อ และ อัตราการไหลต่างๆ สำหรับท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มวงตัวในแนวตรง อัตราส่วนความยาวท่อต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 4.762 ระยะพิท 25 มิลลิเมตร (Fully extended) ได้สร้างจาก สมการทางเอมไพริคัลที่ได้จากการทดลองที่ s0.5P25dT2.5[C] (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ 13ข).....	75
6.5 แสดงแผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ที่ขนาดและอัตราการไหลต่างๆ สำหรับ ท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่วางตัวในแนวโค้ง อัตราส่วนรัศมีความโค้ง ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง ท่อเท่ากับ 6.063 ระยะพิท 23 มิลลิเมตร (Fully extended) ได้สร้างจากสมการทางเอมไพริคัลที่ได้จากการทดลองที่ b1P23dT2.5[C] (ข้อมูลจาก ภาคผนวก ข ตารางที่ 25ข).....	76
6.6 แสดงแผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ที่ขนาดและอัตราการไหลต่างๆ สำหรับท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่วางตัวในแนวโค้ง อัตราส่วนรัศมีความโค้ง ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ 3.028 ระยะพิท 23 มิลลิเมตร (Fully extended) ได้สร้างจากสมการทางเอมไพริคัลที่ได้จากการทดลองที่ b0.5P23dT2.5[C] (ข้อมูลจาก ภาคผนวก ข ตารางที่ 37ข).....	77

## รายการสัญลักษณ์

a	ระยะแอมปริจูด
A	พื้นที่
$c_p$	ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง
$D_h$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
$h_o$	แรงดันน้ำสูญเสียเนื่องจากความโค้งงอของท่อที่ท่อตรงด้านทางออก
$h_i$	แรงดันน้ำสูญเสียรวม
$h_w$	แรงดันน้ำสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ท่อทดสอบ
H	แรงดันน้ำสูญเสียที่ออริฟิซมิเตอร์
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน
K	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้ง
$K_t$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานความโค้งรวม
L	ความยาวท่อ
m	อัตราการไหลโดยมวล
M	ความชัน
Nu	นัสเซลต์นัมเบอร์
p	ความดันลด
P	ระยะพิท
Pr	แฟรน์เคลนัมเบอร์
q	พลังงานความร้อน
$q''$	พลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
Q	อัตราการไหลโดยปริมาตร
r	รัศมี
R	รัศมีความโค้ง
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์
T	อุณหภูมิ
v	ความเร็ว



x ระยะตามทิศทางการไหลของของไหล

#### อักษรกรีก

$\beta$  อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นออริฟิซต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

$\delta_c$  ความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน

$\delta_v$  ความหนาของชั้นขอบเขต

$\rho$  ความหนาแน่น

$\theta$  มุมความโค้ง

$\tau$  ความเค้นเฉือน

$\mu$  ความหนืด

#### ตัวห้อยท้าย

x ตำแหน่งต่างๆในทิศทางตามแกนการไหล

s ที่พื้นผิวท่อ

m ค่าโดยเฉลี่ยของอุณหภูมิ

$m_i$  ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ปากทางเข้าท่อ

$m_o$  ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ทางออกจากท่อ

i ภายในท่อ

I ฉนวนความร้อน