

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนเป็น Coiled-wire และใบบิด

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CIRCULAR TUBE FITTED WITH
COILED-WIRE AND TWISTED TAPE TURBULATORS



วิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง
WITON CHINGTUAYTHONG

ฉพ.
๑๕๗๔๗
๒๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 85161
วัน,เดือน,ปี..... - 4 พ.ย. 2551

b..... 1200๖๕๖๗
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ พ.ศ.2551 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2008-EN-M-030-159

**HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A CIRCULAR TUBE FITTED WITH
COILED-WIRE AND TWISTED TAPE TURBULATORS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2008-EN-M-030-159



COPYRIGHT 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยใช้ตัว สร้างความปั่นป่วนเป็น Coiled-wire และไบบิต
นักศึกษา	นายวิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง
รหัสประจำตัว	48060354
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลม โดยการติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนภายในท่อพื้นที่หน้าตัดคงที่ที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat-flux) โดยใช้ลวดขดเป็นตัวสร้างความปั่นป่วนใส่ภายในท่อทดสอบซึ่งมีการใส่ไบบิตไว้ภายในลวดขดตลอดความยาวเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนบริเวณผิวท่อทดสอบ อิทธิพลของค่าอัตราส่วนระยะพิทลวดขด (P_c) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด (d_c) และอัตราส่วนระยะพิทไบบิต (P_b) ต่อความกว้างไบบิต (W), $[CR : y]$ ในการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในท่อกลมที่ใช้ในการทดสอบ อัตราการไหลของอากาศใช้ทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) ระหว่าง 3000 – 20,000 ผลลัพธ์จากการทดลองนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใส่ลวดขดหรือไบบิตอย่างเดียวในท่อผิวเรียบ ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการใส่ลวดขดพร้อมไบบิตสามารถทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ลวดขดหรือไบบิตอย่างเดียว การใช้ลวดขดและไบบิตร่วมกันที่ค่าอัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนลวดขดที่ค่าน้อยๆ จะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าค่าอัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนลวดขดที่มีค่าสูงๆ ภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกัน

คำสำคัญ : การถ่ายเทความร้อน, ลวดขด, ไบบิต, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, สัมประสิทธิ์
การถ่ายเทความร้อน

Thesis Title	Heat Transfer Enhancement in a Circular Tube Fitted with Coiled-wire and Twisted Tape Turbulators
Student	Mr.Witton Chingtuaythong
Student ID.	48060354
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The thesis presents an experimental study of heat transfer enhancement in a circular tube fitted with coiled-wire and twisted tape turbulators at a constant heat-flux condition. The coiled-wire used as a turbulator is placed inside the test tube while the twisted tape is inserted into the coiled-wire to create a continuous impinging swirl flow over the tube wall. The effects of the ratio of coil pitch (P_c) to wire diameter (d_w) and the ratio of tape pitch (P_t) to twisted tape width (W), [CR: γ] on heat transfer and friction loss in the tube are experimentally investigated. The air mass flow rate in this work is based on the Reynolds number at the tube inlet ranging from 3000 to 20,000. The experimental results are compared with those obtained from using wire coil/twisted tape alone, apart from the smooth tube. The results indicate that the presence of wire coils together with twisted tapes leads to a double increase in heat transfer over the use of wire coil/twisted tape alone. The combined coiled-wire and twisted tape with smaller twist and coil pitch ratios provides higher heat transfer rate than those with larger twist and coil pitch ratios under the same conditions.

Keywords: heat transfer, coiled-wire, twisted tape, friction factor, heat transfer coefficient

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่ผู้วิจัยตั้งใจและทุ่มเทอย่างเต็มที่ ทั้งเพียรพยายามและความสามารถที่มีอยู่ จนกระทั่งสามารถสำเร็จไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา และ รศ.ดร.สมิทธิ์ เตียมสอาด ซึ่งคอยช่วยเหลือเรื่องอุปกรณ์การทดลองตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก รวมทั้งอาจารย์และเจ้าหน้าที่จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลต่างๆ ท่านที่ช่วยเหลืองานในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา เป็นอย่างสูงที่ท่านได้ให้โอกาสในการศึกษา พร้อมทั้งเป็นกำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ และบุคคลผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ที่นี่ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้



วิฑูรย์

ซึ่งถ้อยทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	2
1.6 ขอบเขตวิจัย.....	3
1.7 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา.....	5
2.1 วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน.....	5
2.2 งานวิจัยในอดีต.....	7
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	12
3.1 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน.....	12
3.2 การพาความร้อนจากของไหลที่ไหลผ่านท่อ.....	14
3.3 สภาวะการไหล.....	16
3.4 การสูญเสียความดัน.....	17
3.5 การหาขนาดของปั๊มหรือโบลว์เวอร์.....	18
3.6 การไหลในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วน.....	19
3.7 การสร้างสมการด้วยวิธีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ชุดทดสอบและวิธีการทดสอบ.....	23
4.1 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน.....	23
4.2 ชิ้นงานทดสอบ.....	26
4.3 การติดตั้งท่อทดสอบการถ่ายเทความร้อน.....	27
4.4 ชุดอุปกรณ์การทดสอบ.....	29
4.5 วิธีการทดสอบ.....	35
บทที่ 5 การวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลอง.....	36
5.1 ผลการทดสอบท่อผิวเรียบ.....	36
5.2 ผลการทดสอบกรณีใส่ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร.....	38
5.3 ผลการทดสอบกรณีใส่ใบบิด.....	40
5.4 ผลการทดสอบกรณีใส่ลวดร่วมกับ ใบบิด.....	43
5.5 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ.....	50
5.6 การสร้างสหสัมพันธ์ของ Nu และ f จากการทดสอบ.....	55
5.7 การหาประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....	59
5.8 ตารางสรุปผลจากการทดลองชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ.....	60
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	61
6.1 สรุปผลการทดสอบ.....	61
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิก.....	66
ภาคผนวก ข ตารางสัมประสิทธิ์การสูญเสียและการคำนวณขนาดของ โบลว์เวอร์.....	69
ภาคผนวก ค คุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน.....	74
ภาคผนวก ง ระเบียบวิธีการสร้างสหสัมพันธ์จากผลการทดลอง.....	76

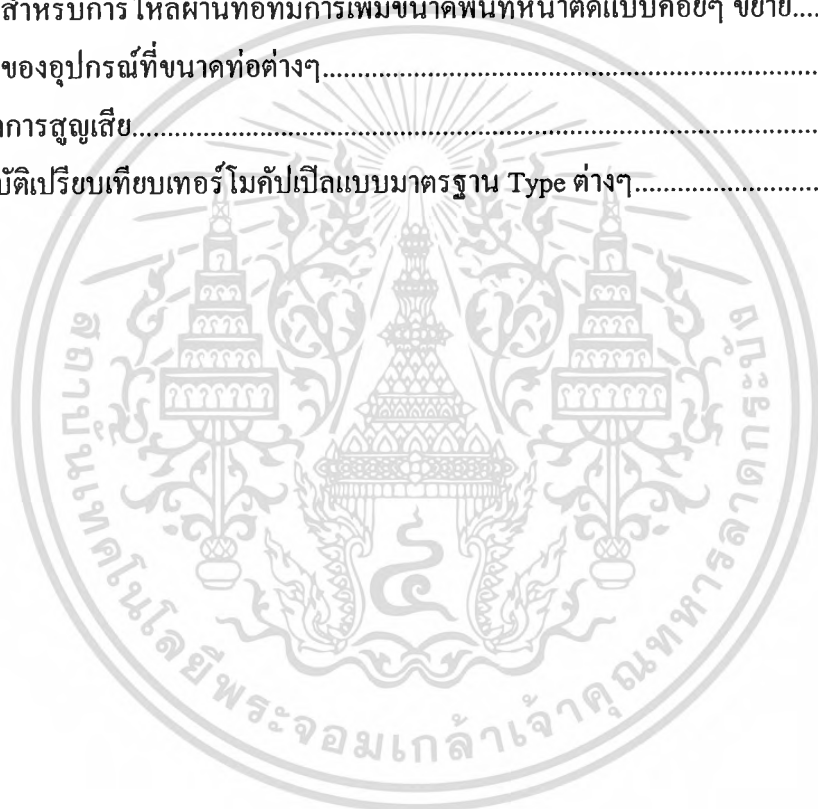
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ ตารางบันทึกผลการทดสอบ.....	82
ภาคผนวก ฉ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	121



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ตารางสรุปผลจากการทดลองชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ.....	60
ก.1 คุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกของอากาศที่ความดันบรรยากาศ.....	67
ก.2 คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะ.....	68
ข.1 ค่า K สำหรับการไหลผ่านท่อที่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด.....	70
ข.2 ค่า K สำหรับการไหลผ่านท่องอ [14]	70
ข.3 ค่า K สำหรับการไหลผ่านท่อที่มีการเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ขยาย.....	70
ข.4 ค่า K ของอุปกรณ์ที่ขนาดท่อต่างๆ.....	72
ข.5 สรุปค่าการสูญเสีย.....	73
ค.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน Type ต่างๆ.....	75



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดลวดขด..... 3
2.1	ตัวอย่างวิธี Active Method ด้วยการใส่พลังงานจากลูกสูบ..... 5
2.2	ตัวอย่างวิธี Passive Method ด้วยการใส่อุปกรณ์เข้าไปภายในท่อ..... 6
2.3	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดแผ่นบิดเกลียว..... 7
2.4	อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแบบลวดขด..... 8
2.5	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนแบบ helical tape..... 8
2.6	อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแบบ (ก) Conical nozzle (ข) Conical nozzle ร่วมกับ Snail 9
2.7	อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแบบ conical – ring และ ใบบิด..... 10
3.1	การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิด้วยการพาความร้อน..... 13
3.2	การพาความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านท่อ..... 15
3.3	การก่อตัวของบาวนด์รีเลย์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อ..... 16
4.1	ไดอะแกรมชุดทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน..... 24
4.2	ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน..... 24
4.3	ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อน..... 25
4.4	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดลวดขด..... 26
4.5	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบบิด..... 26
4.6	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดลวดขดและใบบิด..... 27
4.7	ขั้นตอนการสร้างท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและการติดตั้ง..... 27
4.8	อุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบ..... 30
4.9	โบลว์เวอร์..... 30
4.10	โรตารีเตอร์..... 31
4.11	ขดลวดความร้อน..... 32
4.12	หม้อแปลงไฟฟ้า..... 32
4.13	อุปกรณ์วัดความดัน..... 33
4.14	เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K..... 34
4.15	การติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน..... 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 Digital thermometer.....	35
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ Re กรณีท่อผิวเรียบ.....	36
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re ของท่อผิวเรียบ.....	37
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อน.....	38
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน.....	39
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน..	39
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน.....	40
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ Re กรณีใส่ใบพัดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน.	41
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ใบพัดภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน.....	41
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ใบพัดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	42
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ใบพัดภายในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อน.....	42
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบพัดภายในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อน (กรณีศึกษา $y = 3$)	44
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบพัด ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 3$)	45
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบพัดภายในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อน (กรณีศึกษา $y = 3$)	45
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบพัดภายใน ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 3$)	46
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบพัดภายในท่อแลกเปลี่ยน ความร้อน (กรณีศึกษา $y = 4$)	46
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบพัด ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 4$)	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 4$)	47
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 4$)	48
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 5$)	48
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_o/Nu_i กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 5$)	49
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 5$)	49
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 5$)	50
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ)	51
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_o/Nu_i กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ)	52
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ)	52
5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ)	53
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>enhancement efficiency</i> กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	53
5.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>enhancement efficiency</i> กับ Re กรณีใส่ไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	54
5.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง <i>enhancement efficiency</i> กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิคภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	54
5.30 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีท่อผิวเรียบ.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.31 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีใส่ลวดขดภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน.....	56
5.32 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีใส่ไบบิตภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน.....	57
5.33 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีใส่ลวดขดและไบบิต ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	58
6.1 ชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดที่เว้นค่า PR.....	62



รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัด, m^2
A_s	พื้นที่ผิว, m^2
f_a	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานทดสอบ
f_o	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อผิวเรียบ
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
C_v	ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่, $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m
r	รัศมีที่ตำแหน่งใดๆ, m
r_o	รัศมีที่อกกลม, m
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา, $W/m^2 \cdot K$
k	สมบัติการนำความร้อน, $W/m \cdot K$
L	ความยาวท่อ, m
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล, kg/s
Nu_D	ตัวเลขนัสเซิลต์
Nu_a	ตัวเลขนัสเซิลต์ของชิ้นงานทดสอบ
Nu_o	ตัวเลขนัสเซิลต์ของท่อผิวเรียบ
η	ประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน
Pr	พลาตันน์ัมเบอร์
ΔP	ความดันลด, Pa
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล, m^3/s
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา, W
q_s''	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, $J/kg \cdot K$
Re_D	ตัวเลขเรย์โนลด์
St	สแตนต์ันัมเบอร์
T_x	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ, $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลระหว่างทางเข้า - ออก, $^{\circ}C$
T_i	อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้า, $^{\circ}C$
T_o	อุณหภูมิของของไหลที่ทางออก, $^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

T_s	อุณหภูมิที่ผิวท่อที่ตำแหน่งใดๆ, °C
\bar{T}_s	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่อทั้งหมด, °C
\bar{T}_f	อุณหภูมิแผ่นฟิล์ม, °C
V	ความเร็วเฉลี่ยที่ทางเข้า, m/s
\dot{W}_{in}	พลังงานที่ถ่ายแก่พัลลวม, W
ρ	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m ³
μ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, N·s/m ²
μ_s	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลที่ผิวร้อน, N·s/m ²
ν	ความหนืดจลน์, m ² /s
P_c	ระยะพิทลวดขด, m
P	ระยะพิทไบบิต, m
d_c	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลวดขด, m
W	ความกว้างไบบิต, m
CR	สัดส่วนระยะพิทของลวดขดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางลวดขด (P_c/d_c)
y	สัดส่วนระยะพิท 180° ของไบบิตต่อความกว้างไบบิต (P/W)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้พลังงานในการทำงานสูง ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยผลที่ได้จากศึกษาจะเป็นแนวทางในการลดการใช้วัสดุในการผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและจะเป็นการช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

แนวทางหนึ่งที่มีการใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการใส่ลวดขัดและไบบีดก็เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการใส่ลวดขัด ไบบีด และลวดขัดร่วมกับไบบีดในรูปแบบตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factors, f) และค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Enhancement efficiency, η) ต่อตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re)

2. ศึกษาผลของระยะพิตต่อเส้นผ่าศูนย์กลางลวดขัด, CR ระยะพิตต่อความกว้างไบบีด, y และระยะพิตต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดขัดกับระยะพิตต่อความกว้างไบบีด, $CR:y$

3. ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบท่อเปล่ากับสหพันธ์กับงานทดลองในอดีตที่ได้รับการยอมรับ

4. สร้างสมพันธ์ของตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) และ ประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (η)

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนมีด้วยกัน 3 แบบ คือ 1. การเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนโดยวิธี Active 2. การเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนโดยวิธี Passive และ 3. การเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนโดยวิธี combine

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนโดยวิธี Passive ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยเทคนิคแบบ Passive เป็นเทคนิคที่ทำให้สารทำงาน (อากาศ) เกิดความปั่นป่วนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ความปั่นป่วนของอากาศที่เกิดขึ้นแบ่งออกได้ 2 แบบคือ ความปั่นป่วนที่เกิดจากการหมุนวนของอากาศผ่านใบพัดส่งผลในของไหลเย็น (อากาศ) เกิดการผสมผสานแลกเปลี่ยนกับผิวร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และความปั่นป่วนที่เกิดจากกระแสไหลวนขนาดเล็กรอบๆ ลวดขด (Vortex sheering) ที่ส่งผลให้เกิดการทำลายชั้นฉนวนความร้อนทำให้อุณหภูมิผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนลดต่ำลง

เทคนิคการเพิ่มการไหลแบบหมุนวนของของไหล และทำลายชั้นฉนวนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบได้ เนื่องจากการไหลแบบหมุนวนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับผิวร้อนมากขึ้น ส่วนการทำลายชั้นฉนวนส่งผลให้ความหนาของชั้นฉนวนบางลงมีผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวต่ำลง ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น ซึ่งการใส่ลวดขดและใบพัดเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มการไหลหมุนวนแก่ระบบได้ แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะสูงขึ้น และผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ลวดขดและใบพัด โดยพารามิเตอร์ที่ในการทดสอบนี้คือค่าอัตราส่วนลวดขด (CR) อัตราส่วนใบพัด (y) และ อัตราส่วนลวดขดและใบพัด (CR: y) จะมีผลต่อความปั่นป่วนของของไหลและความเสียดทานของแต่ละชนิดแตกต่างกัน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องคือการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อกลมเรียบด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux Heat Transfer) และการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแบบ Passive ซึ่งไม่ต้องอาศัยงานจากภายนอก

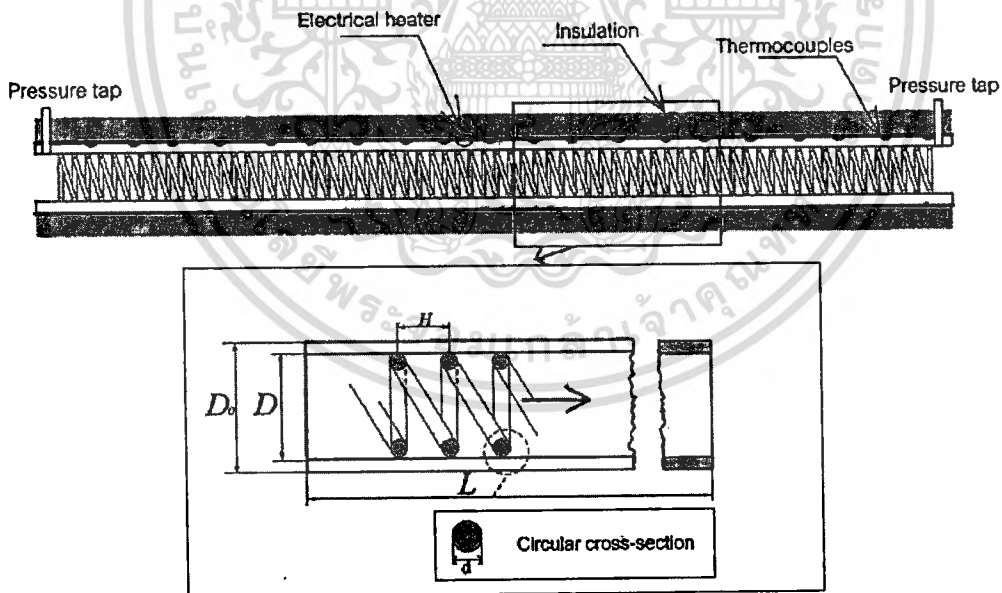
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ทฤษฎีพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลภายในท่อกลมเป็นการถ่ายเทความร้อนกรณีผิวของท่อกลมเป็นแบบผิวเรียบ ซึ่งในการศึกษาจะเป็นการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อกลมกรณีมีการใส่ลวดขดและใบพัด โดยการใส่ลวดขดและใบพัดจัดเป็นรูปแบบหนึ่งของการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการแบบ passive อันจะส่งผลทำให้พื้นที่แลกเปลี่ยนเป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทความร้อนของอากาศเพิ่มขึ้นและสร้างความปั่นป่วนในการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น และเป็นการทำลายชั้นขีดผิวความร้อน (Thermal Boundary Layer) ของระบบ

1.6 ขอบเขตงานวิจัย

1. ท่อทดสอบทำจากทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 47 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร และยาว 1500 มิลลิเมตร
2. ชั้นงานทดสอบแบบลวดขด (coiled-wire) CR = 4, 6, 8 และ 10
3. ชั้นงานทดสอบแบบบิด (twisted tape) $y = 3, 4$ และ 5
4. ชั้นงานทดสอบแบบลวดขดและบิด (coil and tape)
5. การแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นชนิดการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อนที่ผิวคงที่ (Uniform Heat Flux)
6. แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ใช้ในการให้ความร้อนที่ผิวท่อเท่ากับ 80 โวลต์
7. ทดสอบในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนในช่วง Re ระหว่าง 3000 ถึง 20000
8. ใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน



รูปที่ 1.1 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนชนิดลวดขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และพื้นฐานของการถ่ายทอดความร้อน

บทที่ 4 กล่าวถึงอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงการหาค่าสมรรถนะของระบบ พารามิเตอร์ที่ใช้และผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถที่ช่วยให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

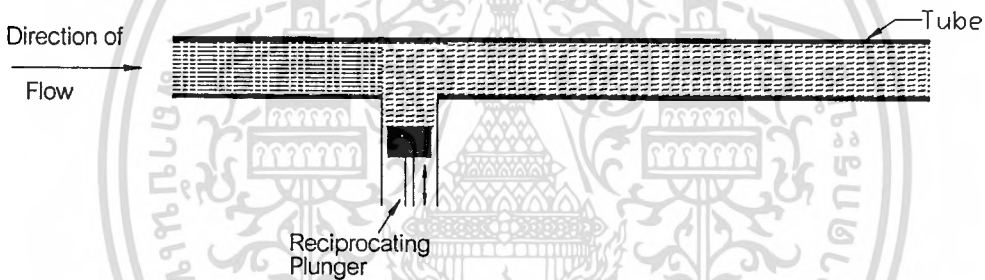
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ปัจจุบันได้มีวิธีการแบบต่างๆ โดยมีวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

2.1 วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยมี 3 วิธีด้วยกัน คือ

1. Active Method

วิธีที่นำเอาพลังงานภายนอกเข้ามาช่วยในกระบวนการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การใช้อุปกรณ์ทางกลที่ทำให้เกิดการสั่นของของไหล การทำให้เกิดการสั่นของพื้นผิว การใช้สนามแม่เหล็ก (magnetic field) รบกวนส่วนที่ไหลมากับของไหล

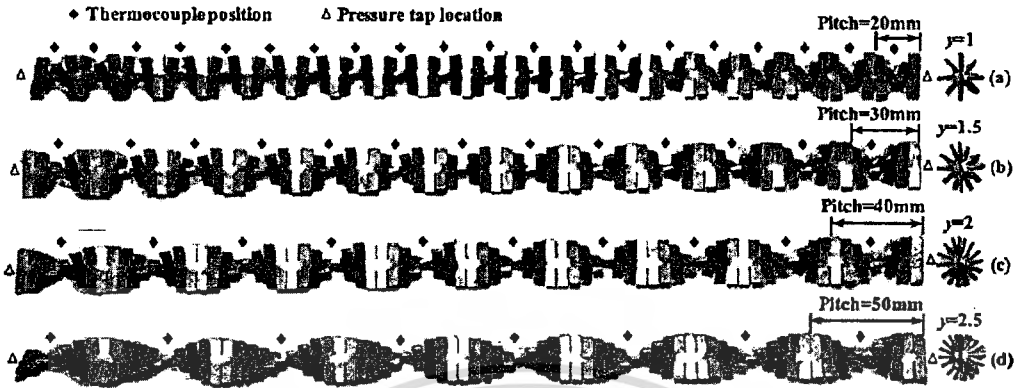


รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวิธี Active Method ด้วยการใส่พลังงานจากลูกสูบ

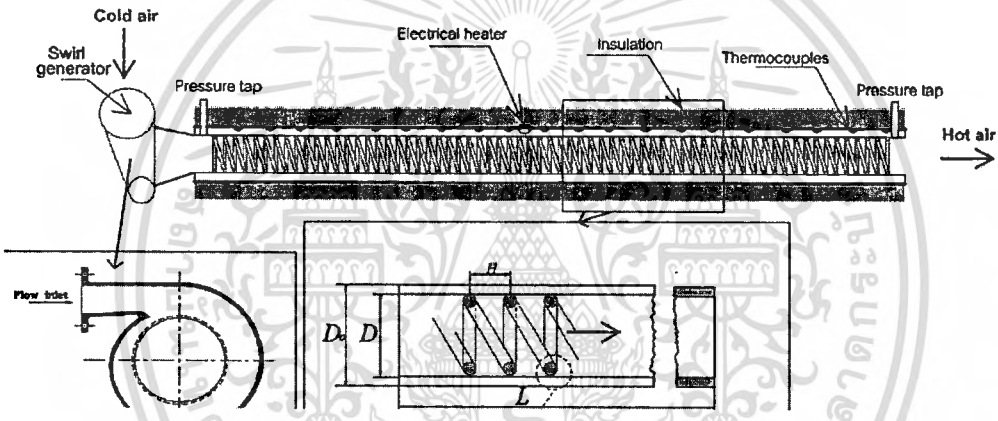
2. Passive Method

วิธีที่ไม่ต้องนำพลังงานภายนอกเข้ามากระตุ้น โดยพลังงานที่ใช้ ได้จากพลังงานที่สร้างขึ้นด้วยตัวเอง ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางในหมู่นักวิจัย ต่างประเทศรวมทั้งในงานวิจัยครั้งนี้ด้วย จุดประสงค์เพื่อพัฒนาการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น โดยการลดกำลังงานสูญเสีย (pump power losses) ให้น้อยลง แต่ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วผลของกำลังงานสูญเสียนี้น่าเป็นสิ่งที่ไม่ดีเลยไม่ได้ แต่สามารถที่จะทำให้น้อยลงได้โดยขึ้นอยู่กับวิธีและเทคนิคในการออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อน[1] ซึ่งวิธีที่ข้อมรับกันคือการเพิ่มค่า h หรือการเพิ่มพื้นที่ผิวการพาให้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น ค่า h อาจเพิ่มได้โดยทำให้ผิวขรุขระเพื่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ทำได้โดยการใส่ใบพัดที่มีการตัดแต่งรูปทรงต่างๆ (Broken twisted tapes, η) เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนแก่สารทำงาน หรือการใช้วัสดุหมุนวนชนิดเป็นเกลียว และติดตั้งตัวสร้างลมหมุนที่ทางเข้า (Coiled wire insert and snail entry, χ) หรือการสร้างลมหมุนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มีการบังคับทิศทางการทำงานแบบใบพัดเกลียว (right-left helical screw, κ) การเพิ่มอัตราการผลิตไม่วารณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

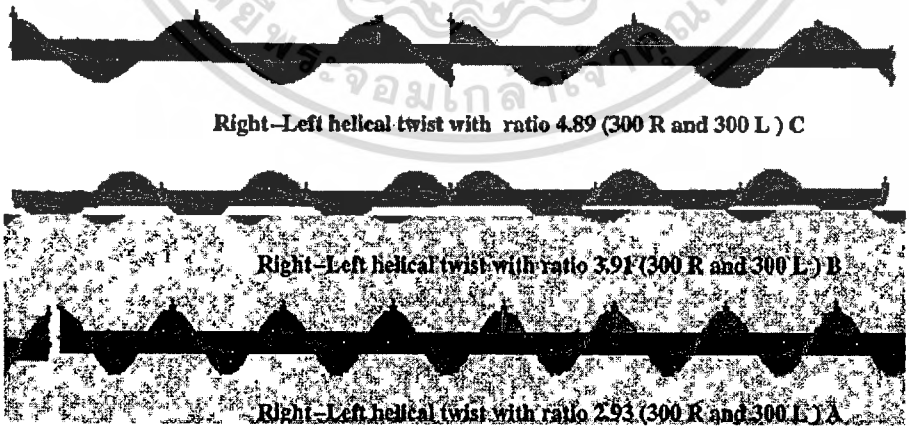
ความร้อนอาจเป็นผลให้เกิดความดันตกคร่อม (pressure drop) มากขึ้น การศึกษาขึ้นจะต้องคำนึงถึงค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นและพลังงานที่เพิ่มขึ้นในการขับเคลื่อนพัดลมหรือปั๊ม



(ก) Broken twisted tapes of twist ratios [1]



(ข) Coiled wire insert and snail entry [2]



(ค) Diagram of right-left helical screw inserts [3]

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างวิธี Passive Method ด้วยการใส่อุปกรณ์เข้าไปภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Compound Method

วิธีที่ใช้เทคนิคของ Active Method และ Compound Method รวมกัน ซึ่งวิธีการนี้จะมีความยุ่งยากในการออกแบบ และถูกจำกัดในการใช้งาน

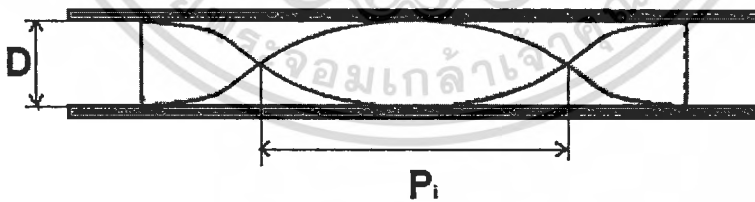
2.2 งานวิจัยในอดีต

โดยทั่วไปการไหลแบบหมุนวนในท่อสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1. การไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วง (Decaying swirl flow) คือการที่ของไหลเคลื่อนที่ภายในท่อที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุนวนเฉพาะบริเวณที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ไว้ โดยที่ลักษณะการหมุนวนจะลดลงตามแนวการไหล

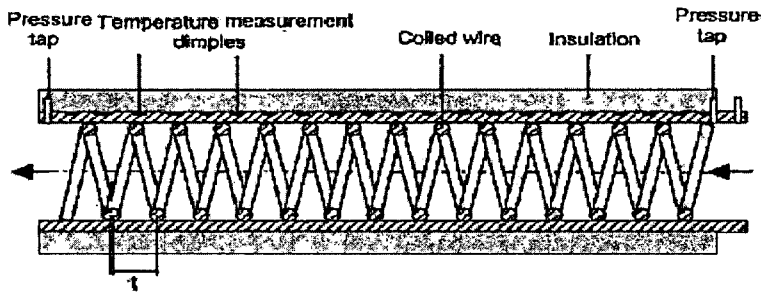
2. การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง (Continuous swirl flow) คือการที่ของไหลเคลื่อนที่ภายในท่อที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้การไหลของของไหลเกิดการหมุนวนตลอดความยาวท่อ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Yildiz et al [4] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนชนิดแผ่นบิดเกลียวที่ทำจากโลหะบาง ซึ่งถูกติดตั้งภายในท่อถ่ายเทความร้อนชนิด Double pipe แบบไหลตามกัน (Parallel) และไหลสวนทาง (Counter flow) ด้วยระยะพิทที่แตกต่างกัน ของไหลที่ใช้ในการทดลองจะใช้อากาศร้อนไหลอยู่ภายในท่อ โดยมีน้ำเย็นไหลล้อมรอบอยู่ภายนอก ในส่วนของค่า Nu ที่ได้จากการทดลองท่อเปล่าจะนำมาขึ้นชั้นกับผลของ Dittus-Boelter ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่า Nu และ Pressure drop จะสูงจากเดิมถึง 100% และ 130% ตามลำดับ ในท่อที่มีแผ่นบิดเกลียวอยู่ภายใน ดังรูป



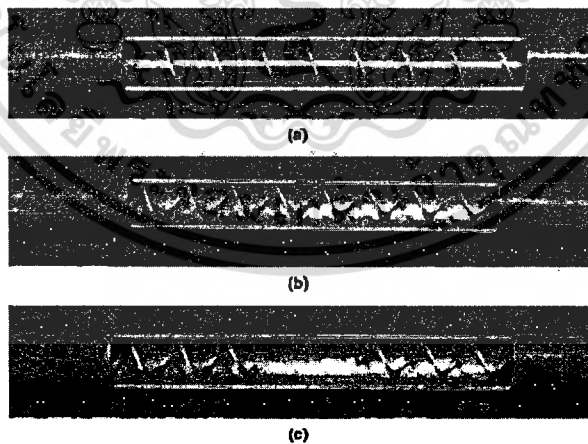
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดแผ่นบิดเกลียว

Yakut and Sahin [5] ศึกษาโดยวิธีทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบลวดขด (coiled - wire) ตัวกำเนิดความปั่นป่วนแบบการหมุนวนเป็นช่วงๆ สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแบบลวดขด

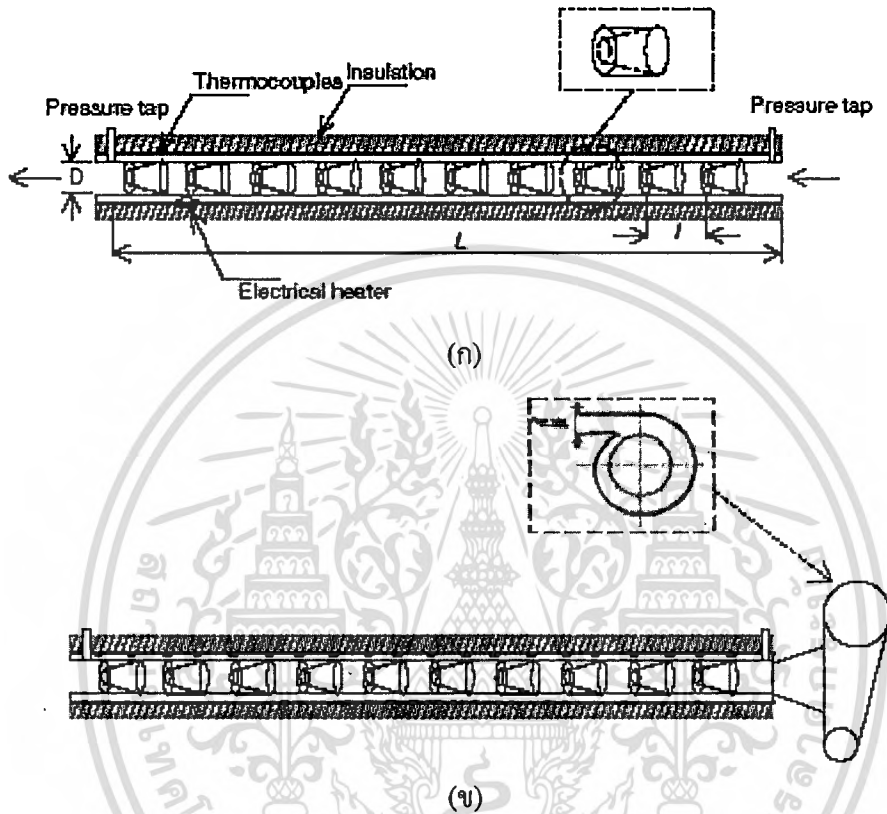
Eiamsa-ard and Promvonge [6] ศึกษาถึงอิทธิพลของการใส่ helical tape ในท่อการถ่ายเทความร้อน ดังรูป 2.5 ซึ่ง helical tape ที่ถูกใส่เข้าไปในท่อจะช่วยสร้างให้เกิดการไหลหมุนวน ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อ โดยอัตราการไหลในท่อจะพิจารณาในช่วง $Re\ 2,300 - 8,800$ ในการติดตั้งอุปกรณ์ (a) ใส่ helical tape แบบเต็มท่อนชนิดมีแกน (b) ใส่ helical tape แบบไม่มีแกน (c) ใส่ helical tape แบบเว้นช่วงภายในท่อ โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะใช้อากาศร้อนส่งผ่านเข้าไปในท่อโดยมีน้ำเย็นไหลล้อมรอบอยู่ภายนอก ผลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับท่อเปล่า ซึ่งสรุปได้ว่า helical tape ชนิดมีแกน อัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงที่สุดประมาณ 10% ซึ่งดีกว่าแบบไม่มีแกน แต่ pressure drop จะสูง ส่วน helical tape แบบเว้นช่วง จะใช้อัตราส่วน $(s = L_s / L_h)$ เท่ากับ 0.5 , 1.0 , 1.5 และ 2.0 ซึ่งพบว่าในช่วง $Re < 4,000$ ผลของการใส่ helical tape ที่อัตราส่วน $s = 0.5$ จะได้ค่า Nu สูงสุดที่ประมาณ 50% เมื่อเทียบกับท่อเปล่า



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนแบบ helical tape

Promvonge and Eiamsa-ard [7] ศึกษาถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการให้ความร้อนที่ผิวคงที่โดยใช้ Conical nozzles จะเป็นเหมือนเครื่องสร้างการไหลแบบปั่นป่วน และชุดหอยโข่ง(Snail) จะเป็นเหมือนเครื่องสร้างการไหลหมุนวน (Swirl generator) มาช่วยในการทดลอง โดย Conical nozzles จะถูกติดตั้งไว้ภายในท่อที่มีอากาศไหลผ่าน ซึ่งมีระยะพิค

(PR) แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 2.0 , 4.0 และ 7.0 ภายใต้เงื่อนไขคือจะใช้ชุดหอยโข่ง(Snail) เป็นตัวสร้างการไหลหมุนวนบริเวณทางเข้าของท่อทดสอบ ซึ่งพบว่าการใช้ Conical nozzle และ Snail จะช่วยในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าท่อเปล่าถึง 278% และ 206% ถ้าใช้ Conical nozzle คู่กับ Snail จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงถึง 316%

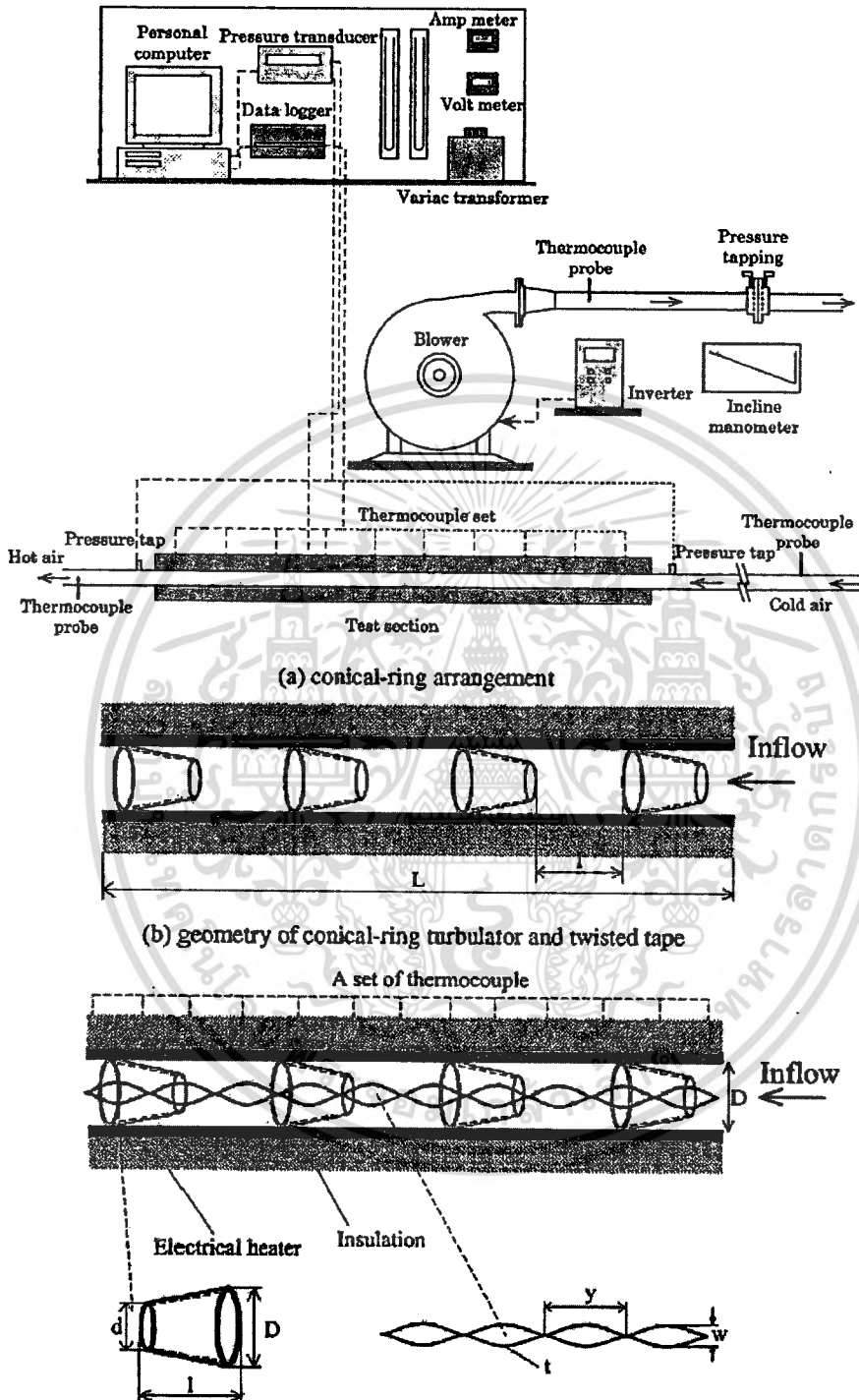


รูปที่ 2.6 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแบบ (ก) Conical nozzle (ข) Conical nozzle รวมกับ Snail

Promvongse and Eiamsa-ard [8] การศึกษาโดยการทดลองการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีการใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบ conical – ring และไบบิต

การทดสอบการถ่ายเทความร้อน โดยการให้ความร้อนที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ที่เงื่อนไขกำหนด ในการทดลองได้แบ่งการทดลองเป็น 2 แบบคือ หนึ่งใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนแบบ conical – ring ใส่ในท่อทดสอบและ ใช้ตัวกำเนิดการหมุนวนแบบไบบิตใส่ ณ ตำแหน่งเดียวกันกับ conical – ring ที่แกนอ้างอิงจากท่อทดสอบ ซึ่งอากาศเป็นของไหลทดสอบในการศึกษานี้ ซึ่งการทดสอบจะอยู่ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 6,000 ถึง 26,000 โดยใช้ไบบิตสองชั้นที่อัตราส่วนไบบิต $y=3.75$ และ 7.5 ในการทดลอง ผลลัพธ์จากการทดลองที่ใส่ conical – ring และ ไบบิต ที่ค่าตัวเลขนัสเซลสูงจะสูงกว่า ประมาณ 4 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ และ ประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนประมาณ 4 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ conical – ring เพียงอย่างเดียว โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนไม่วากรณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสูงสุดมีค่าเท่ากับ 367 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.96 ที่ใช้ conical – ring ร่วมกับไบบิตที่ค่า $Y = 3.75$



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนแบบ conical – ring และไบบิต

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาจึงนำไปสู่แนวคิดที่จะศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้

อุปกรณ์ช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบลวดขดและไบบิต ซึ่งวิธีการนี้เป็นเทคนิคการไหลหมุนวน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบต่อเนื่อง (Continuous swirl flow) โดยอากาศที่ไหลผ่านลวดขดและใบบิตจะเกิดการไหลแบบหมุนวนภายในชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 อย่างหลักๆ ด้วยกันคือ สัดส่วนระยะพิทต่อความกว้างของใบบิต (y) และสัดส่วนระยะพิทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดขด (CR) เนื่องจากค่า y ของใบบิตและค่า CR ลวดขดมีผลต่อการไหลของอากาศภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงค่าการสูญเสียความดันที่จะเกิดขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์การออกแบบระบบความร้อนที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ซึ่งได้แก่การจำแนกประเภทของการถ่ายเทความร้อนในแบบต่างๆ สภาวะการไหล การสูญเสียความดัน รวมไปถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล กรณีแบบท่อผิวเรียบ (ท่อเปล่า) และแบบใส่อุปกรณ์ช่วยในการถ่ายเทความร้อนเข้าไปภายในท่อ

3.1 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน แบ่งออกได้ 3 ประเภทคือ

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของมวลตัวกลาง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิขึ้นในวัตถุก้อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำซึ่งใช้ q_k เป็นสัญลักษณ์นี้จะเป็นส่วนกับ dT/dx โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้นขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (Thermal conduction), k ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

เมื่อ q_k = อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ (W)

k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)

A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)

T = อุณหภูมิ (K)

x = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)

สมการ (3.1) นี้มีชื่อเรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการเป็นผลที่เนื่องมาจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมินั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะทาง x เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกเมื่อไหลไปในทิศทางที่เป็นบวกแล้ว ก็จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ทางด้านขวาของสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection Heat Transfer)

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหรือการพาความร้อน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของของไหล เพราะจะเกิดขึ้นในก๊าซและของเหลวเท่านั้น การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection)
2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวของการพาความร้อนแบบอิสระนั้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในก้อนของไหลเนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างของการพาความร้อนแบบอิสระนี้ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่ไม่มีลมพัด การพาความร้อนภายในกาต้มน้ำที่มีขดลวดให้ความร้อน

การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิมิขนาดเท่าๆกันแล้ว การพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า แต่ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบไหนก็ตาม ต่างมีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปสมการเป็น

$$q_c = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

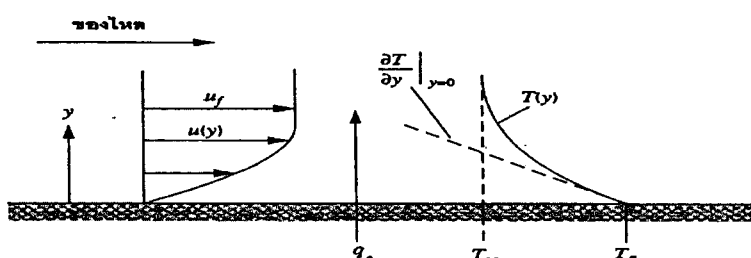
เมื่อ q_c = อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (W)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2.K$)

A_s = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล (m^2)

T_s = อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)

T_∞ = อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมากๆ (K)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิด้วยการพาความร้อน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation Heat Transfer)

ความร้อนจากการนำและการพาจะเคลื่อนที่ผ่านได้เฉพาะในกรณีที่มีวัสดุมาเป็นตัวกลาง (Medium) เท่านั้น สำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางเลย เช่น ในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เป็นต้น พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 3×10^{10} cm/s พลังงานที่เคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่มากมายหลายชนิด เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีอินฟราเรด เป็นต้น ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุที่มีอุณหภูมิ T_1 ไปยังวัตถุที่อยู่รอบๆ และมีอุณหภูมิ T_2 จะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.3)$$

เมื่อ q_r = อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (W)

σ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann constant มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} W/m².K⁴

ϵ_1 = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

A_1 = พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (m²)

T_1 = อุณหภูมิผิวของวัตถุแผ่รังสี (K)

T_2 = อุณหภูมิผิวของวัตถุที่อยู่รอบๆ (K)

โดยในการทดสอบจะไม่นำค่าการนำความร้อนและการแผ่รังสีมาคิด เนื่องจากความหนาของท่อที่ใช้มีค่าน้อยและการนำความร้อนของวัสดุ (ทองแดง) มีค่าสูง (ภาคผนวก ก-2) ทำให้ความต้านทานความร้อนประมาณได้ว่าเป็นศูนย์ $R_{wall} \approx 0$ ส่วนของการแผ่รังสี ซึ่งจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการพาความร้อนซึ่งสามารถที่จะตัดออกได้

3.2 การพาความร้อนจากของไหลที่ไหลผ่านท่อ (Convection heat transfers in flow through tubes)

การพาความร้อนจากของไหลที่ไหลผ่านท่อ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวท่อสามารถแบ่งเงื่อนไขที่ผิวออกได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant surface heat flux)

2. กรณีอุณหภูมิที่ผิวคงที่ (Constant surface temperature)

สำหรับการไหลในท่อที่ยาว L ที่มีอุณหภูมิผิวเป็น T_s นั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมทั้ง

ท่อถ่ายเทให้แก่ของไหลนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในก้อนของไหล

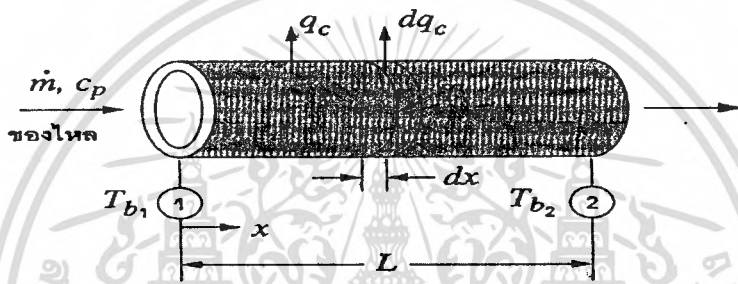
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_c = \dot{m}C_p\Delta T = \rho\frac{\pi D^2}{4}V_{av}C_p(T_{b1} - T_{b2}) \quad (3.4)$$

เมื่อ T_{b1} = อุณหภูมิเฉลี่ยของก้อนของไหลที่ไหลเข้าท่อ (K)

T_{b2} = อุณหภูมิเฉลี่ยของก้อนของไหลที่ไหลออกจากท่อ (K)

สำหรับในเทอมของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อในช่วงสั้นๆ ที่มีความยาว dx ดังรูปที่ 3.2 จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก้อนของไหลในช่วงเดียวกันนั้น และมีความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่าง $T_s(x)$ ของท่อกับอุณหภูมิ $T_b(x)$ ของก้อนของไหลที่หน้าตัดนั้นๆ



รูปที่ 3.2 การพาความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านท่อ

ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้คือ

$$dq_c = \dot{m}C_p dT = h_x(\pi D)dx(T_s - T_b) \quad (3.5)$$

ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยรวม h สำหรับการไหลที่ไหลผ่านท่อเป็น

$$\dot{m}C_p(T_{b2} - T_{b1}) = hA_s(T_s - T_b)_{av} \quad (3.6)$$

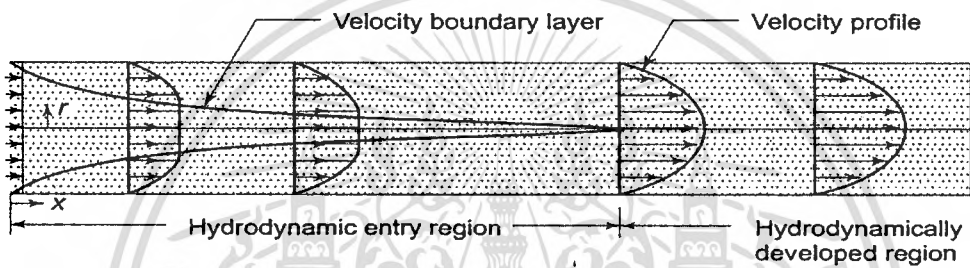
เมื่อ A_s = พื้นที่สัมผัสระหว่างผนังท่อกับของไหล (m^2)

เนื่องจากอุณหภูมิ T_s และ T_b นี้จะแปรตลอดความยาวของท่อ ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในสมการ (3.6) นั้นก็จะต้องเป็นค่าของความแตกต่างเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สถานะการไหล

การไหลภายในท่อมืดข้อแตกต่างจากการไหลภายนอก คือ การไหลภายในท่อมืดขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของบาวนด์รีเลเยอร์ ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวนด์รีเลเยอร์ก็นำตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้เรียกว่า การไหลที่กำลังปรับตัว (Developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region พิจารณาการไหลแบบลามินาร์ ในท่อกลม ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การก่อตัวของบาวนด์รีเลเยอร์ของการไหลแบบลามินาร์ในท่อ

สำหรับการไหลภายในท่อมืดนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (Entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการไหลนั้นเป็นอย่างไรแบบลามินาร์หรือเทอร์บูเลนต์ ซึ่งจำแนกการไหลได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ซึ่งเป็นสัดส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงจากความหนืด (Viscous force) สำหรับการไหลภายในท่อกลมกำหนดเป็น

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (3.7)$$

เมื่อ Re = ตัวเลขเรย์โนลด์

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m)

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

ν = ความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)

เงื่อนไขการรูปแบบการไหล

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)	$Re < 2300$
การไหลในช่วงเปลี่ยนแปลง (Transition to turbulent)	$2300 \leq Re \leq 4000$
การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)	$Re > 4000$

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ($Re < 2300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัวได้จากสมการ

$$L \approx 0.05 Re D \tag{3.8}$$

ส่วนการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ($Re > 4000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าจะไม่เกี่ยวข้องกับค่า Re และมีค่าประมาณ ดังนี้

$$L/D \geq 10 \tag{3.9}$$

3.4 การสูญเสียความดัน (Pressure Drop)

ปริมาณอีกอย่างหนึ่งที่สนใจในการวิเคราะห์การไหลในท่อก็คือ การสูญเสียความดัน (Pressure Drop) และเกี่ยวข้องกับความต้องการขนาดของปั๊มหรือ โบลว์เวอร์ ที่จะทำให้เกิดการไหลตามต้องการ การสูญเสียความดันของการไหลในท่อความยาว L แสดงออกมาเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \tag{3.10}$$

เมื่อ ΔP = การสูญเสียความดัน (N/m^2)

f = friction factor

L = ความยาวท่อ (m)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

V = ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

3.5 การหาขนาดของปั๊มหรือโบลว์เวอร์

ในการทดสอบเราจะใช้โบลว์เวอร์ทำให้เกิดการไหลของอากาศภายในท่อ เราสามารถคำนวณค่าการสูญเสีย (Head loss) ทั้งระบบเพื่อหาขนาดของโบลว์เวอร์ ได้ดังนี้

การสูญเสียภายในท่อสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือ การสูญเสียหลัก (Major loss) และการสูญเสียรอง (Minor loss)

1. การสูญเสียหลัก (h_f)

สำหรับการไหลเต็มท่อภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D และ L ด้วยความเร็วเฉลี่ย V สำหรับของไหลที่มีความหนืดจะทำให้เกิดความเสียดทานต่อการไหลขณะไหลผ่านท่อตรง เหน็ดสูญเสียหลักจะใช้สมการคาร์ซี-ไวส์บาคในรูปของสมการ

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3.11)$$

2. การสูญเสียรอง (h_m)

สำหรับเฮดสูญเสียรองเป็นผลมาจากการไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ข้อเพิ่มหรือวาล์ว อยู่ในรูปของสมการ

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad (3.12)$$

เมื่อ K = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss coefficient)

จากสมการพลังงานของการไหล จะได้

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{loss} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 \quad (3.13)$$

เมื่อ h_p = head ของปั๊ม (m)

h_{loss} = head ของการสูญเสียภายในท่อ = $h_f + h_m$ (m)

P_1 = ความดันบรรยากาศจุดที่ 1 (N/m^2)

P_2 = ความดันบรรยากาศจุดที่ 2 (N/m^2)

V_1 = ความเร็วของของไหลจุดที่ 1 (m/s)

V_2 = ความเร็วของของไหลจุดที่ 2 (m/s)

z_1 = ระดับความสูงจุดที่ 1 (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 z_2 &= \text{ระดับความสูงจุดที่ 2 (m)} \\
 \rho &= \text{ความหนาแน่นของของไหล (kg/m}^3\text{)} \\
 g &= \text{แรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s}^2
 \end{aligned}$$

จากสมการหาคำลังงาน จะได้

$$Power = Q\Delta P \quad (3.14)$$

เมื่อ $Power =$ กำลังของโบลว์เวอร์ (W)

$Q =$ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)

3.6 การไหลในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow in Tubes)

สมการสำหรับหาค่า Nu และค่า f ในท่อกลมเรียบ(ท่อเปล่า)

Dittus-Boulter [9]

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (3.15)$$

โดยที่ $n = 0.4$ สำหรับการทำให้ร้อน, $n = 0.3$ สำหรับการทำให้เย็น

สมการนี้ใช้สำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้

$$0.7 \leq Pr \leq 160$$

$$Re \geq 10000$$

$$L/D \geq 10$$

Petukhov [9]

$$Nu = \frac{Re_D \cdot Pr(f/8)}{[1.07 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)\sqrt{f/8}] \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^n} \quad (3.16)$$

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (3.17)$$

สำหรับช่วง $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้ใช้สำหรับเงื่อนไขดังนี้

$n = 0$ สำหรับเงื่อนไขของ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ หรือของไหลที่เป็นก๊าซชนิดต่างๆ

$n = 0.11$ สำหรับกระบวนการทำให้ของเหลวร้อนขึ้น ($T_s > T_m$)

$n = 0.25$ สำหรับกระบวนการทำให้ของเหลวเย็นลง ($T_s < T_m$)

Blasius [9]

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad \text{สำหรับในช่วง } Re \leq 20000 \quad (3.18)$$

$$f = 0.184 Re^{-0.2} \quad \text{สำหรับในช่วง } Re \geq 20000 \quad (3.19)$$

คุณสมบัติต่างๆ ที่ T_b ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$T_b = \frac{(T_o + T_i)}{2} \quad (3.20)$$

สมการสำหรับหาค่า Nu และค่า f ที่ได้จากการทดสอบ

สำหรับการทดสอบกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในก้อนของไหลที่ไหลผ่านท่อ ซึ่งดูได้จากสมการ (3.5-3.6) จะได้ว่า

$$q_c = hA_s(\bar{T}_s - T_b) \quad (3.21)$$

$$q_A = mC_p(T_o - T_i) \quad (3.22)$$

จากการสมมูลความร้อน เมื่อ q ในสมการที่ (3.21) และ (3.22) เท่ากัน จะได้

$$h = \frac{mC_p(T_o - T_i)}{A_s(\bar{T}_s - T_b)} \quad (3.23)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.24)$$

โดยที่

$$T_b = \frac{(T_o + T_i)}{2} \quad (3.25)$$

$$\bar{T}_s = \frac{\sum T_s}{n} \quad (3.26)$$

เมื่อ T_i = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าของของไหล (K)

T_o = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกของของไหล (K)

A_s = พื้นที่ผิวภายในท่อที่สัมผัสกับของไหล (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\overline{T_s}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของท่อ (K)

T_b = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าและทางออก (K)

n = จำนวนจุดที่วัดอุณหภูมิ

สำหรับค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน (f) สามารถหาได้จากสมการ (3.10) จะได้ว่า

$$f = \frac{2D\Delta P}{\rho V^2 L} \quad (3.27)$$

3.7 การสร้างสมการด้วยรีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร (Multiple Linear Regression)

โดยทั่วไป ตัวแปรตามแต่ละตัวหรือค่าตอบสนอง (Response ; y) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ n (Independent หรือ Regressor variables) เช่น x_1, x_2, \dots, x_n เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ สามารถอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [9] ที่เรียกว่า “สมการรีเกรสชัน” (สมการถดถอย ; Regression equation) แบบจำลองรีเกรสชันจะสอดคล้องกับกลุ่มของข้อมูลของตัวอย่าง บางกรณีผู้ทดสอบทราบถึงฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร เช่น $y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่จะไม่ทราบฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่าของฟังก์ชันเพื่อประมาณค่า ϕ โดยในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel มาช่วยในการหาฟังก์ชัน

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน ค่า Nu มักมีตัวแปรอิสระที่สนใจศึกษามากกว่า 1 ตัวแปร เช่น Re, Pr และพารามิเตอร์อื่นๆ เป็นต้น แบบจำลองทั่วไปที่ใช้จะอยู่ในรูปแบบของ Multiple Exponential Regression Model คือ

$$y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} x_3^{b_3} \dots x_n^{b_n} \quad (3.28)$$

ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูป Multiple Linear Regress in Logarithmic Scale คือ

$$\ln(y) = \ln b_0 + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + b_3 \ln(x_3) \dots + b_n \ln(x_n) \quad (3.29)$$

เมื่อ b_0 = ค่าคงที่

b_i = ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของเส้นตรงของตัวแปร x_i

จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์การถดถอย

1. เพื่อสร้างสมการถดถอยซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร เพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรตัวหนึ่งเรียกว่า ตัวแปรตาม จากการกำหนดค่าตัวแปรอีกตัวหนึ่งหรือหลายตัว ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรอิสระ
2. เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้สมการถดถอยพยากรณ์ค่าตัวแปรที่สนใจ
3. เพื่อวัดสัดส่วนของความแปรปรวนในตัวแปรตามว่าเนื่องมาจากตัวแปรอิสระมีค่า เป็นเท่าไร เมื่อเทียบกับความแปรปรวนทั้งหมด
4. เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ชุดทดสอบและวิธีการทดสอบ

การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องมีการออกแบบและการคำนวณหาอุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ เพื่อความเหมาะสมต่อการใช้งานและต้นทุนการสร้างชุดทดสอบ โดยคำนวณเฉพาะส่วนที่มีความสำคัญ เช่น ขนาดของขดลวดความร้อน ขนาดของพัดลม ความหนาของฉนวนความร้อน การเลือกใช้วัสดุ และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เป็นต้น

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ใส่ชิ้นงานเพิ่มความปั่นป่วนของของไหลภายในท่อโดยการใส่ลวดขัดและใบพัดไว้ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีการออกแบบและการคำนวณหาอุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานและต้นทุน

4.1 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

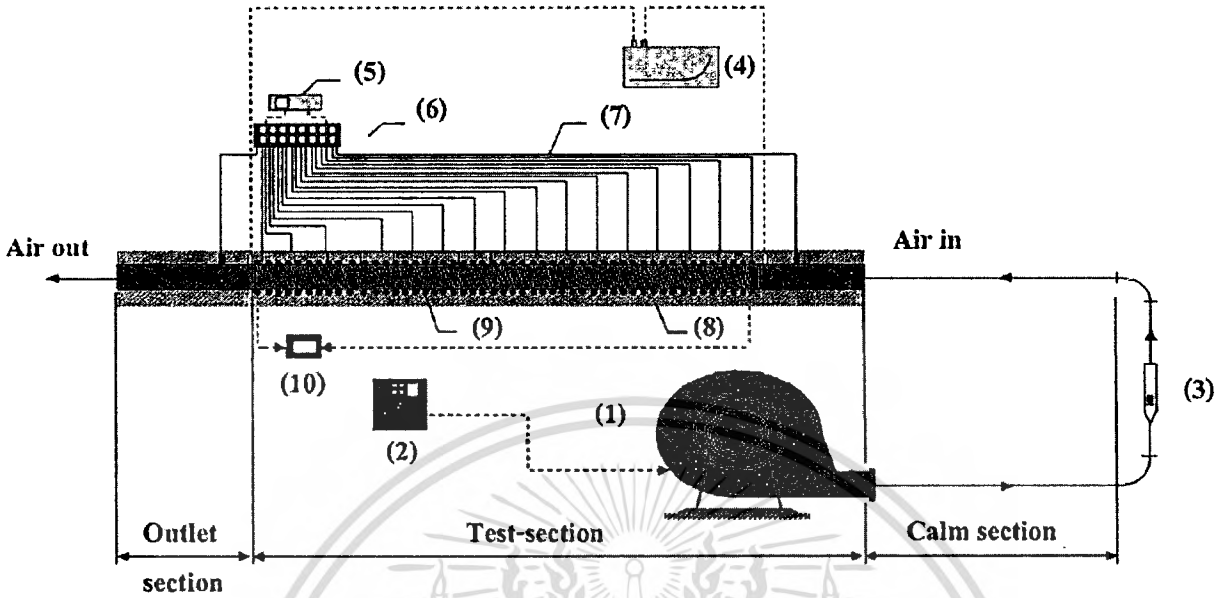
ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $D_i = 47$ มิลลิเมตร มีความหนาเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และยาว 1500 มิลลิเมตร ภายในท่อทองแดงมีการใส่ชิ้นงานสร้างความปั่นป่วนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบลวดขัดและใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของลวดขัด 45 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด 5 มิลลิเมตรตลอดความยาวท่อ โดยวัสดุที่ทำลวดขัดทำจากเหล็ก St 37 และใบพัดทำจากอลูมิเนียมขนาดความหนา 1.2 มิลลิเมตรตลอดความยาวท่อ ส่วนที่ผิวภายนอกของท่อทองแดงมีการติดตั้งชุดทำความร้อน (Heater) โดยมีการฝังสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) จำนวน 10 จุดที่ผิวท่อทองแดง ตลอดความยาวท่อและติดตั้งสายวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและออก 2 จุดซึ่งที่ผิวท่อได้มีการหุ้มฉนวนความร้อนอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศ

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย

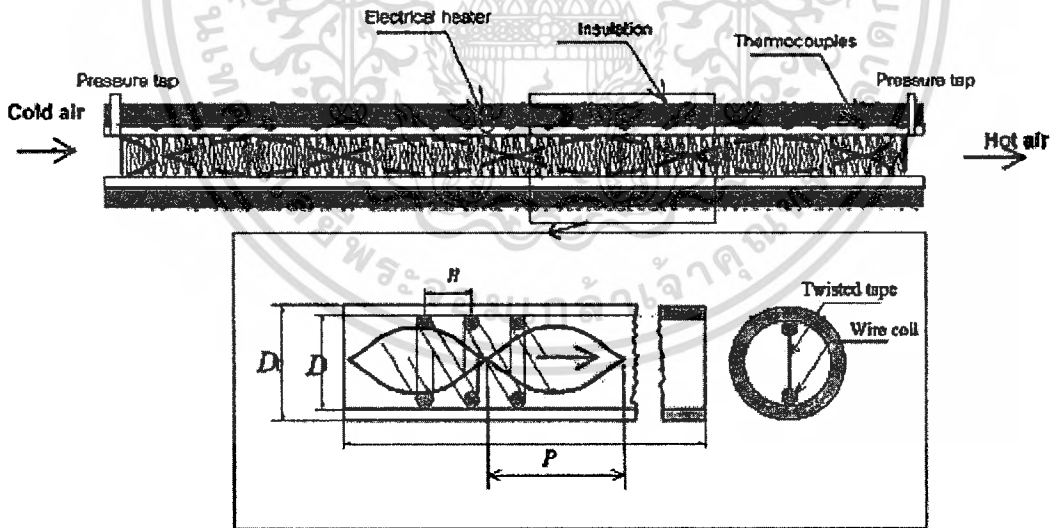
1. อุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบ (Inverter)
2. โบลว์เวอร์ (Blower)
3. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Rotameter)
4. ฉนวนกันความร้อน (Insulation)
5. ขดลวดความร้อน (Heating coil)
6. หม้อแปลงไฟฟ้า (Variac Transformer)
7. อุปกรณ์วัดความดัน (Manometer)
8. สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (Digital thermometer)

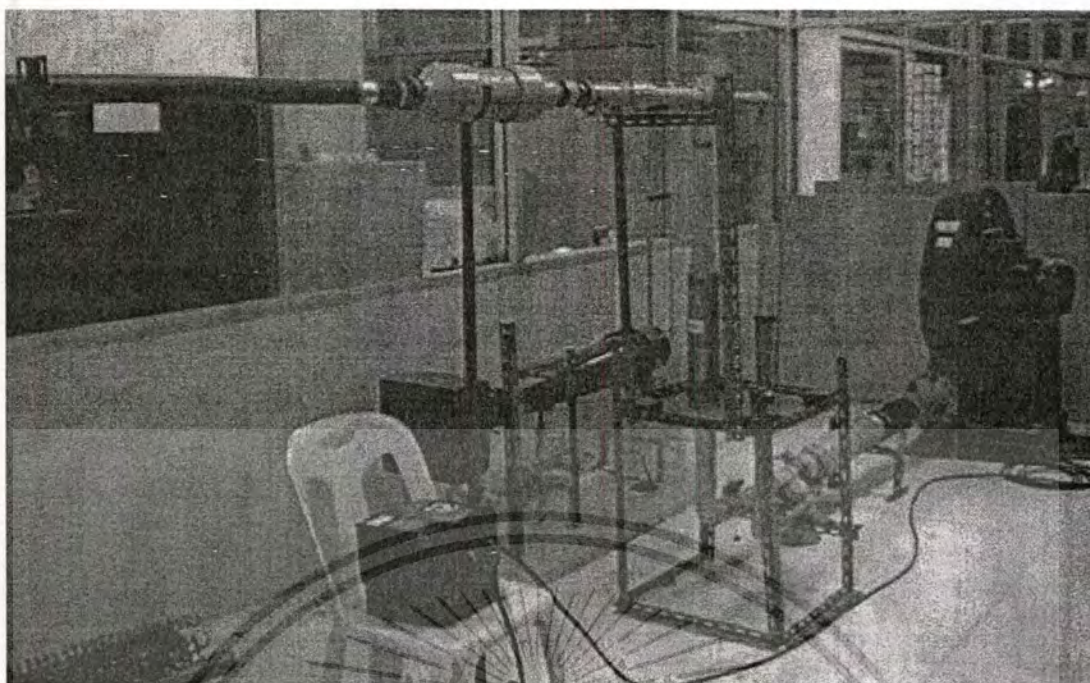


รูปที่ 4.1 โค้ดแกรมชุดทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

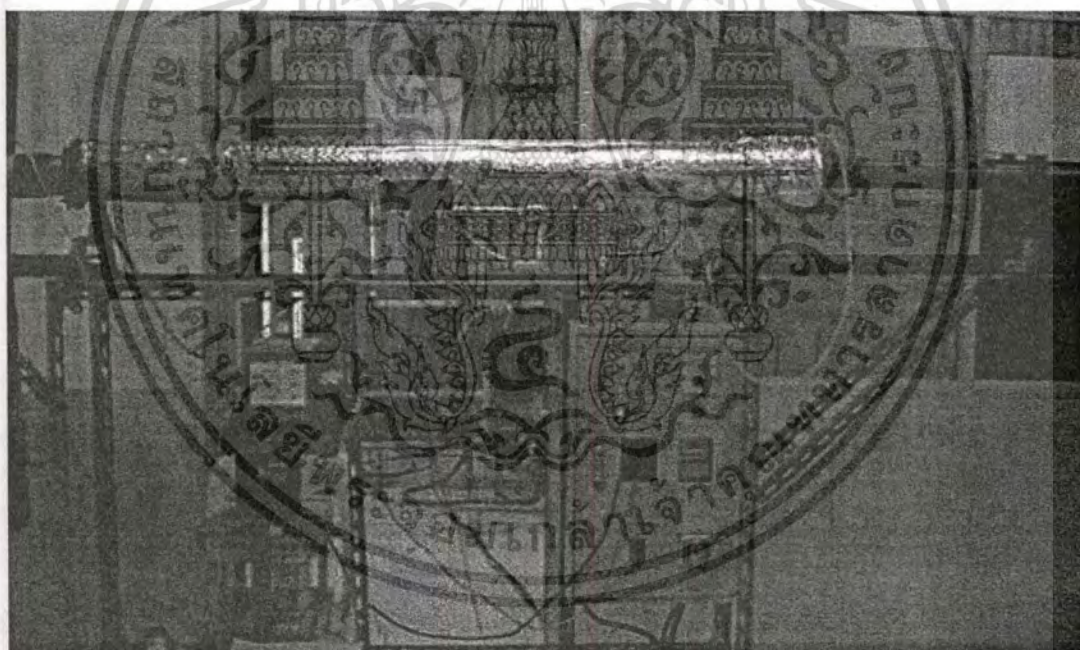


รูปที่ 4.2 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อน

(ก) ส่วนค้ำของชุดทดสอบที่ใช้สร้างลม

(ข) ส่วนท้ายของชุดทดสอบที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย ชิ้นงาน 3 แบบ

1. ชิ้นงานทดสอบแบบลวดขด (Coiled-wires) ศึกษาที่ค่า CR = 4, 6, 8 และ 10
2. ชิ้นงานทดสอบแบบไบบิด (Twisted-tapes) ศึกษาที่ค่า $y = 3, 4$ และ 5
3. ชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดและไบบิด (Coil and Tape) กรณีศึกษาแบ่งออกได้ 3 แบบ

โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนในการกรณีปรับเปลี่ยนไบบิดที่ค่า Twisted ratio (y) ประกอบด้วย

3.1 ศึกษาที่ค่า $y = 3$; CR: $y = 4:3, 6:3, 8:3$ และ $10:3$

3.2 ศึกษาที่ค่า $y = 4$; CR: $y = 4:4, 6:4, 8:4$ และ $10:4$

3.3 ศึกษาที่ค่า $y = 5$; CR: $y = 4:5, 6:5, 8:5$ และ $10:5$

คุณสมบัติของท่อทดสอบ

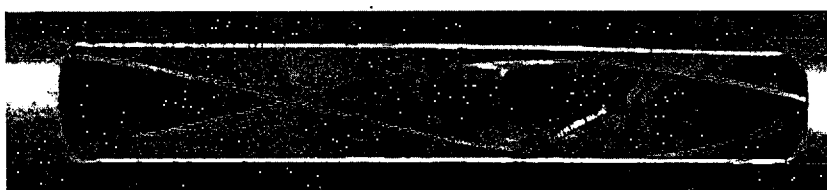
- มีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความแข็งแรงปานกลาง

คุณสมบัติของลวดขดและไบบิด

- ลวดขดจะทำจากเหล็กเหนียว St 37 ซึ่งมีความแข็งแรงไม่มาก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย วัสดุชนิดนี้จะมีราคาถูก แข็งแรงพอสมควร สามารถนำมาชุบแข็งได้ในระดับหนึ่งและสามารถทนความร้อนได้ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$
- ไบบิดทำจากอลูมิเนียม ซึ่งอลูมิเนียมจะทนต่อการกัดกร่อนได้ดี แข็งแรงราคาถูก และสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 660°C



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดลวดขด



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดไบบิด

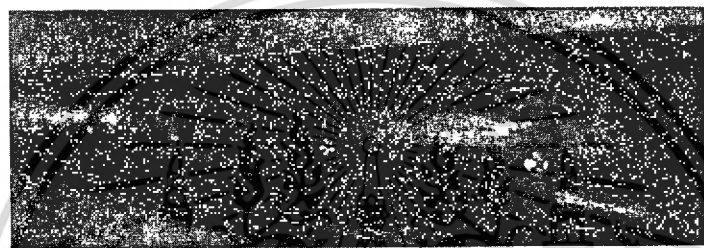
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดลวดขดและไบบิต

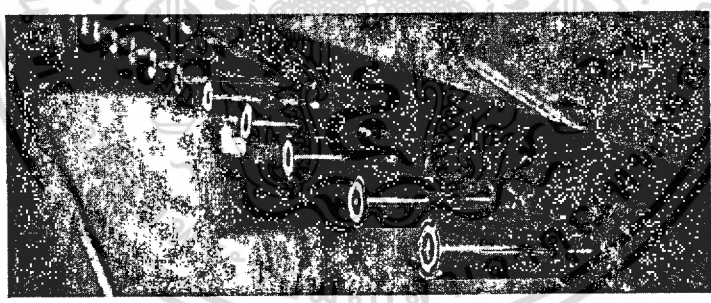
4.3 การติดตั้งท่อทดสอบการถ่ายเทความร้อน

- การทำให้จุดวัดอุณหภูมิสัมผัสท่อทองแดงแนบกันสนิท



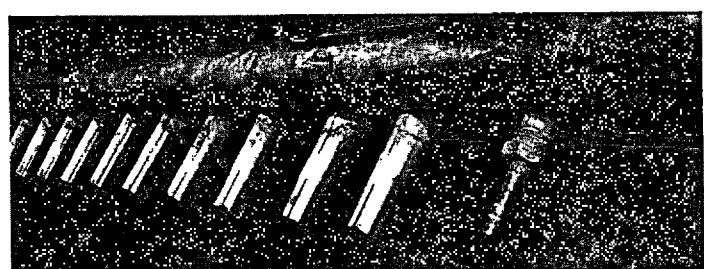
(ก) แสดงการทำให้จุดวัดอุณหภูมิสัมผัสท่อทองแดง

- การเตรียมจุดวัดอุณหภูมิผิวท่อของท่อทองแดงทั้ง 10 จุด ตามรูปที่ 4.8



(ข) แสดงวิธีการทำจุดสำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิวท่อ

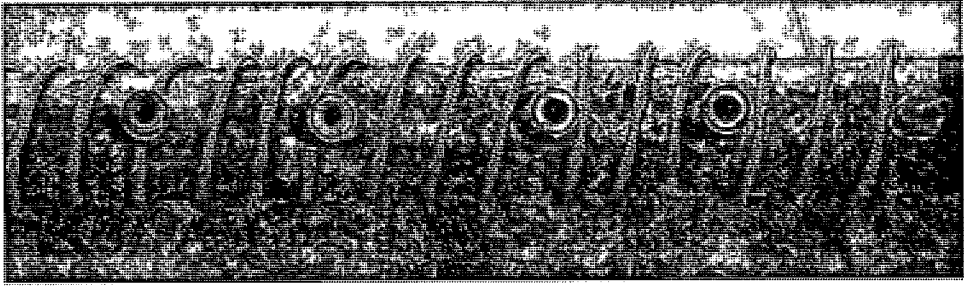
- การเตรียมจุดวัดความดันลดที่บริเวณทางเข้าและออกของชุดเปลี่ยนความร้อน



(ค) แสดงวิธีการทำจุดวัดความดันลดของชุดแลกเปลี่ยนความร้อน

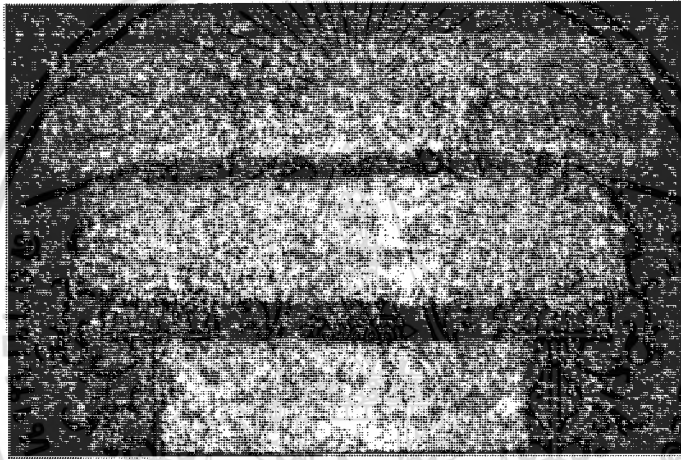
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการสร้างท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและการติดตั้ง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การพันฮีสเตอร์ไฟฟ้ารอบท่อทองแดงที่กำหนดให้มีระยะเท่ากันตลอดความยาวท่อ

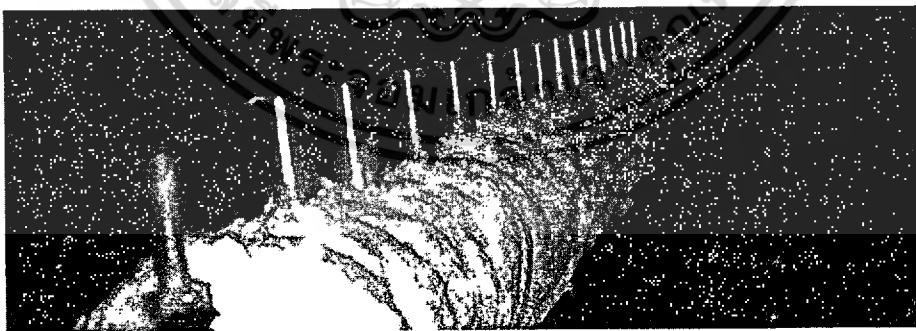


(ง) แสดงวิธีการพันฮีสเตอร์ไฟฟ้ารอบๆ ท่อทองแดง

- ส่วนสุดท้ายเป็นการหุ้มฉนวนและการเคีบงาน



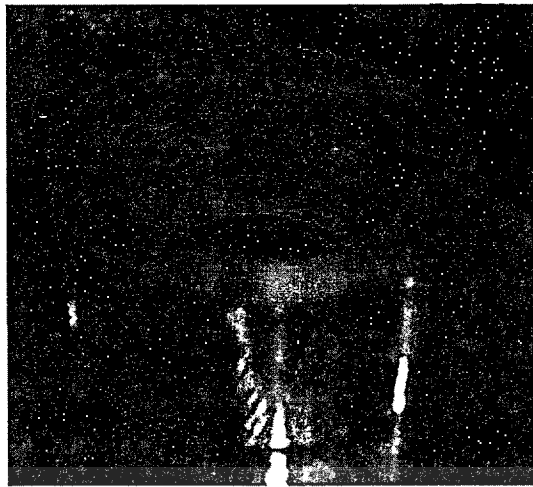
(จ) ฉนวนแบบใยหินสามารถทนอุณหภูมิได้ประมาณ 1200°



(ฉ) แสดงวิธีการหุ้มฉนวนรอบๆ ท่อทองแดง

รูปที่ 4.7 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เทปอลูมิเนียม



(ข) แสดงวิธีการหุ้มฉนวนเทปอลูมิเนียม

รูปที่ 4.7 (ต่อ)

4.4 ชุดอุปกรณ์การทดสอบ

4.4.1 อุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบ (Inverter)

เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ปรับค่าแรงดันไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบของอุปกรณ์ให้ได้ตามความต้องการ ในที่นี้จะใช้ควบคุมความเร็วรอบของโบลต์เวอร์ ทำให้โบลต์เวอร์ทำการจ่ายลมตามปริมาณที่ต้องการทำการวัดค่า การทำงานของอุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบนี้ คือทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบ แล้วทำการเพิ่มหรือลดความถี่กระแสไฟฟ้า ซึ่งจะมีตัวเลขแสดงขึ้นที่หน้าจอของอุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบจากนั้นอุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบจะทำการจ่ายความถี่กระแสไฟฟ้าตามที่ได้ปรับค่าไว้เข้าสู่โบลต์เวอร์ ทำให้โบลต์เวอร์มีความเร็วรอบสูงหรือต่ำตามปริมาณความถี่ของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์ปรับอัตราความเร็วรอบ

4.4.2 โบลว์เวอร์ (Blower)

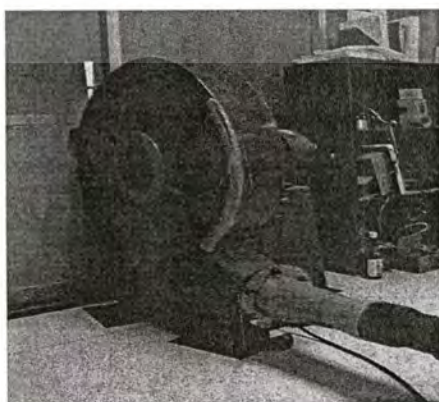
โดยทั่วไปจะแบ่งตามลักษณะการไหลของของไหลที่ไหลผ่านใบพัดและลักษณะโครงสร้างของโบลว์เวอร์ ซึ่งการแบ่งตามลักษณะการไหลของของไหลที่ไหลผ่านใบพัดจะมี 2 แบบคือแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแบบไหลตามแนวแกน

โบลว์เวอร์แบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal fan) ลักษณะของของไหลที่ไหลผ่านใบพัดจะไหลผ่านในแนวรัศมีของใบพัด ซึ่งจำแนกรูปร่างของใบพัดได้ดังนี้

- โบลว์เวอร์แบบแรงเหวี่ยง ชนิดใบพัดโค้งหลัง (Backward curved)
- โบลว์เวอร์แบบแรงเหวี่ยง ชนิดใบพัดโค้งหน้า (Forward curved)
- โบลว์เวอร์แบบแรงเหวี่ยง ชนิดใบพัดตรง (Radial tipped)

-โบลว์เวอร์แบบไหลตามแนวแกน (Axial fan) ลักษณะของของไหลที่ไหลผ่านผ่านใบพัดจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับแนวรัศมีของใบพัดและมีทิศทางขนานกับแนวแกนของเพลา

ในที่นี้เลือกใช้โบลว์เวอร์แบบแรงเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งหน้า(Forward curved) เนื่องจากอากาศที่ไหลออกมาจะมีความเร็วสูงจึงได้รับพลังงานส่วนมากในรูปแบบของความเร็ว ชุดใบพัดเล็กมีความเร็วรอบต่ำ ดังนั้นโบลว์เวอร์จึงไม่มีเสียงดังมากและมีการสั่นสะเทือนน้อย การคำนวณกำลังของโบลว์เวอร์ที่ใช้ ดูได้จาก (ภาคผนวก ข) ซึ่งในการทดสอบนี้จะใช้ขนาด 10 Hp

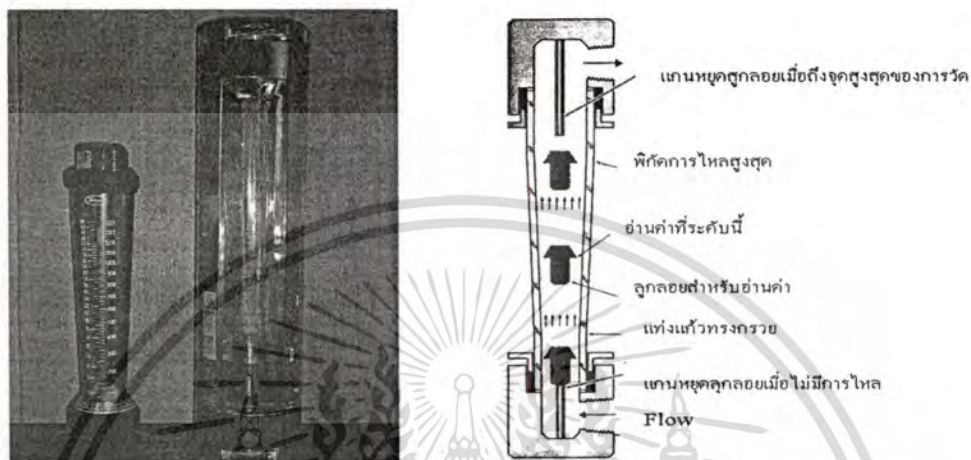


รูปที่ 4.9 โบลว์เวอร์ (Blower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้แบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Rota meter)

ตัวมิเตอร์เป็นแก้วใส รูทรงกระบอกเรียวและมีลูกลอยที่ทางออก ของไหลจะไหลจากด้านล่าง มายังด้านบน เมื่อเกิดสมดุลแรงน้ำหนักของลูกลอยกับแรงอากาศที่ดันขึ้นแล้วก็จะหยุดนิ่ง ทำให้ อ่านอัตราการไหลของน้ำได้ ดังรูป



รูปที่ 4.10 โรตานิเตอร์

4.4.4 ฉนวนกันความร้อน (Insulation)

ระบบท่อน้ำร้อน ถังเก็บน้ำร้อน ท่อไอน้ำ ท่อความเย็น หรืออุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับความร้อน หรือเย็น และมีจุดประสงค์จะกักเก็บพลังงานเหล่านั้นเอาไว้ ต้องจัดการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการ สูญเสียพลังงานร้อนหรือเย็นออกจากระบบสู่บรรยากาศภายนอก หรือจากรอบนอกเข้าสู่ระบบ และช่วย คงอุณหภูมิภายในให้คงที่ตามความต้องการ ลดการเสียเปล่าของพลังงานความร้อนหรือเย็น กักเก็บ พลังงานเอาไว้ไม่ให้ถ่ายโอนออกไป และประหยัดค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนแก่ระบบ หลักการ หุ้มฉนวนต้องพิจารณาถึงการสูญเสียไปของพลังงานความร้อนหรือเย็นเกิดขึ้นเนื่องจากเหตุใดบ้าง จุดประสงค์ของการหุ้มฉนวนพอสรุปได้ดังนี้

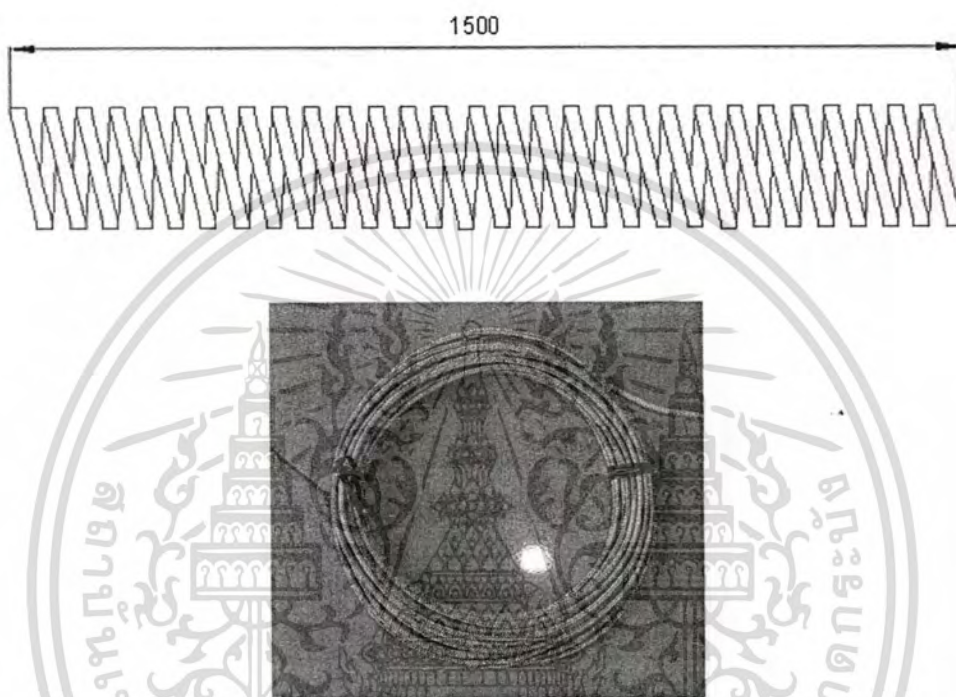
1. สงวนพลังงานเพราะลดการสูญเสียความร้อน
2. ควบคุมอุณหภูมิผิว ป้องกันอันตรายต่อบุคคลและให้มีความสุขสบาย
3. เพื่อความสะดวกต่อการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการ
4. ป้องกันการไหลของไอน้ำ และน้ำที่กลั่นตัวที่ผิวเย็น
5. เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความร้อน ความเย็น และระบบพลังงาน

ในงานอุตสาหกรรมหรืออื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ขดลวดความร้อน (Heating coil)

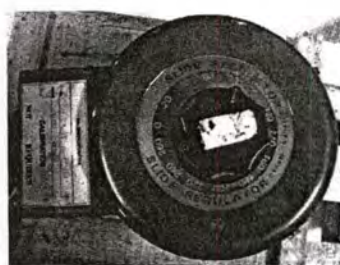
เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนโดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน ทำให้เกิดความร้อน โดยกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 3000 W, ให้อุณหภูมิได้สูงสุด 200 °C ขนาดของขดลวดความร้อนที่ใช้เป็นเส้นลวดแบน หน้าตัดของเส้นลวด 0.25 × 4 mm. ซึ่งในการทดสอบใช้วิธีพันลวดความยาวท่อที่ทำ การทดสอบ



รูปที่ 4.11 ขดลวดความร้อน (Heating coil)

4.4.6 หม้อแปลงไฟฟ้า (Variac Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นเครื่องกลไฟฟ้าหนึ่งที่ใช้ถ่ายทอดกำลังไฟฟ้า จากระดับแรงดันหนึ่งไปยังอีกแรงดันหนึ่งอาจสูงขึ้นหรือต่ำลง หรืออาจเท่าเดิมก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้เป็นตัวควบคุมแรงดันและกระแสที่ขดลวดความร้อน โดยค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบใช้ที่ 80 V



รูปที่ 4.12 หม้อแปลงไฟฟ้า (Variac Transformer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 อุปกรณ์วัดความดัน (Manometer)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดผลต่างความดันระหว่างจุด 2 จุด โดยอาศัยหลักสมดุลของของเหลวที่ใส่เข้าไปในมานอมิเตอร์ (Incline manometer) โดยบรรจุของเหลวชนิดเดียวกัน จุดปลายของมานอมิเตอร์ทั้ง 2 ด้านจะต่อเข้ากับท่อที่ต่อไปยังจุดที่ต้องการวัดความดันแตกต่าง ซึ่งความดันแตกต่างระหว่าง 2 จุด วัดได้จากความแตกต่างของของเหลวที่ได้จากมานอมิเตอร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$P_A - P_B = \rho g \Delta h \quad (4.1)$$

เมื่อ P_A = ความดันที่ตำแหน่ง A, (N/m^2)

P_B = ความดันที่ตำแหน่ง B, (N/m^2)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s^2

Δh = ความแตกต่างระดับความสูงของของเหลว (m)



รูปที่ 4.13 อุปกรณ์วัดความดัน

4.4.8 สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

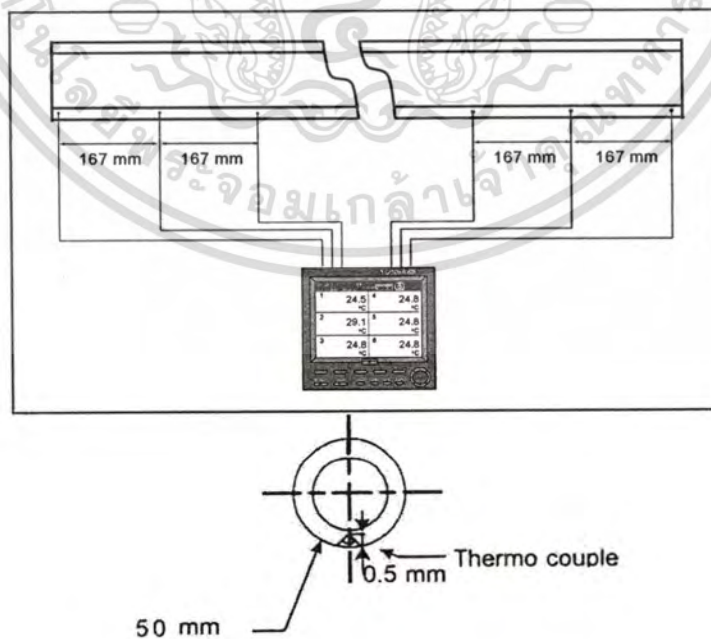
เทอร์โมคัปเปิลมีหลายชนิดให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิและลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละชนิดนี้ เกิดจากการเลือกใช้คู่ของวัสดุ (Element) ของโลหะ ที่นำโลหะชนิดต่าง ๆ กันมาจับคู่เชื่อมเข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลที่ได้แตกต่างกันไป ซึ่งสามารถดูคุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิลแบบต่าง ๆ ได้จาก (ภาคผนวก ก)

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่ทำจากคู่ของวัสดุโครเมิล/อะลูเมล ซึ่งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิในช่วง -270 ถึง 1372°C เพราะโครงการนี้ใช้วัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 0 ถึง 200°C ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวท่อทองแดงที่อยู่ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 10 จุด โดยมีระยะห่างระหว่างสายเท่าๆกันตลอดความยาวของท่อทองแดง ซึ่งการติดตั้งต้องทำการบากท่อทองแดงให้เป็นร่องประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาของท่อ แล้วนำสายเทอร์โมคัปเปิลมาเชื่อมติดกับบริเวณที่ทำการบากให้เป็นเนื้อเดียวกับท่อทองแดง โดยค่าอุณหภูมิที่วัดได้จะเป็นอุณหภูมิของผิวท่อทองแดง อีกบริเวณหนึ่งที่จะทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล คือ บริเวณทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ปลายของสายเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองจะอยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของท่อทองแดง เพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของอากาศภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4.14 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

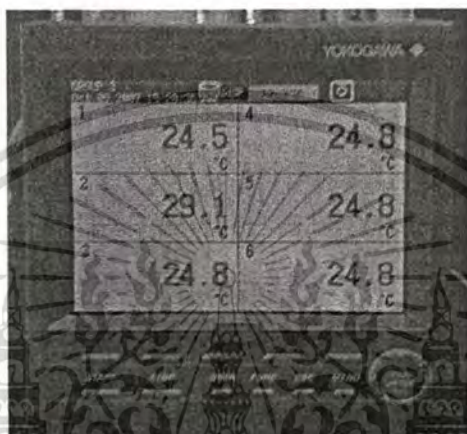


รูปที่ 4.15 การติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.9 อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (Digital thermometer)

อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ (Digital thermometer) เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณ(อุณหภูมิ)จากสายเทอร์โมคัปเปิล แล้วทำการประมวลผลเป็นค่าอุณหภูมิออกมาเป็นตัวเลขแสดงที่จอแสดงผล เนื่องจากสายเทอร์โมคัปเปิลมีหลายเส้นซึ่งใช้วัดอุณหภูมิในแต่ละจุด โดยแต่ละเส้นจะต่อเข้ากับช่องของอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ ถ้าต้องการทราบค่าอุณหภูมิจุดอื่นที่สูงกว่า ให้กดปุ่มเปลี่ยนช่องสัญญาณแล้วค่าอุณหภูมิที่ต้องการทราบก็จะแสดงที่จอแสดงผล



รูปที่ 4.16 Digital thermometer

4.5 วิธีการทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. ทดสอบโดยการใส่ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ที่ค่า CR ต่างกัน คือ CR = 4, 6, 8 และ 10
2. ทดสอบโดยการใส่ไบบิตที่ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ที่ค่า y ต่างกัน คือ y = 3, 4 และ 5
3. ทดสอบโดยการใส่ลวดขนาดผสมกับไบบิต โดยใช้ลวดขดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ที่ค่า CR และ y ต่างๆ

ในแต่ละการทดสอบเริ่มจากการตรวจสอบสภาพชุดอุปกรณ์การทดสอบให้พร้อมใช้งาน จากนั้นปรับหม้อแปลงไฟฟ้า (Variac Transformer) ไปที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบซึ่งใช้แรงดัน 80 V อัตราการไหลของอากาศจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมโบลว์เวอร์ (Blower 10 Hp) การวัดค่าอัตราการไหลของอากาศจะใช้โรตاميเตอร์วัดในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของอากาศที่บริเวณทางเข้าชุดแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง 3000 และ 20000 จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อมจากมานอมิเตอร์ บันทึกอุณหภูมิทางเข้าออกและอุณหภูมิที่ผิวท่อ 10 จุดจาก Digital thermometer แล้วนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

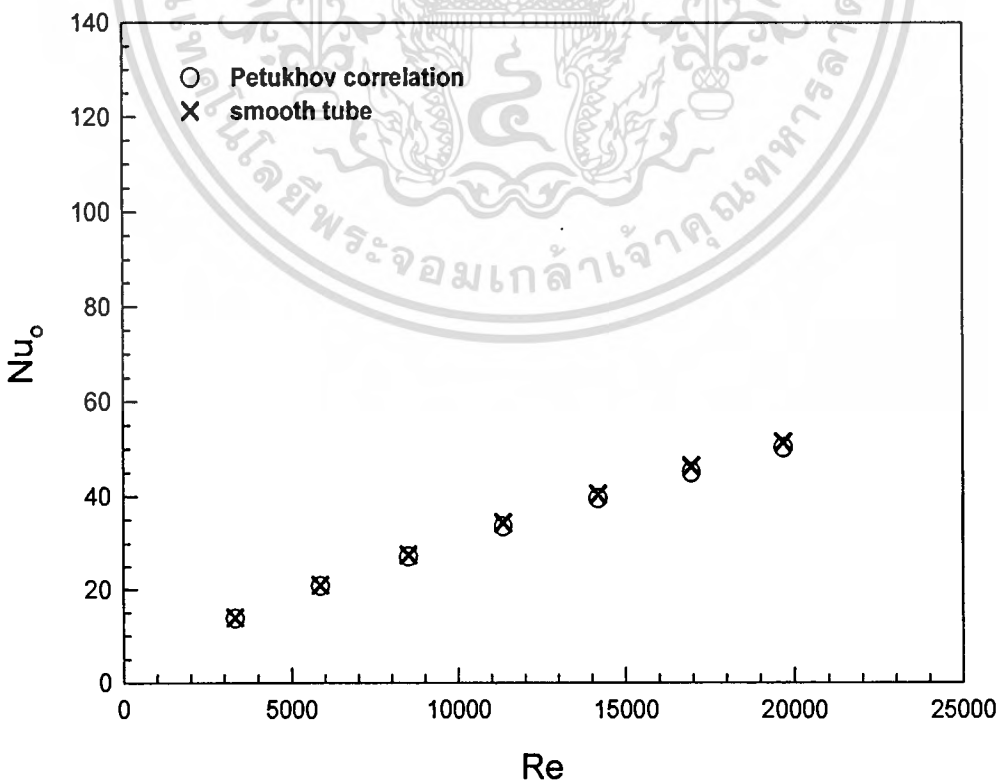
วิเคราะห์และอธิบายผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อกลมผิวเรียบ (smooth tube) และกรณีที่มีการใส่อุปกรณ์ช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยผลของท่อผิวเรียบจะนำมาเปรียบเทียบกับสมการจากงานในอดีตที่เชื่อถือได้ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบท่อผิวเรียบ

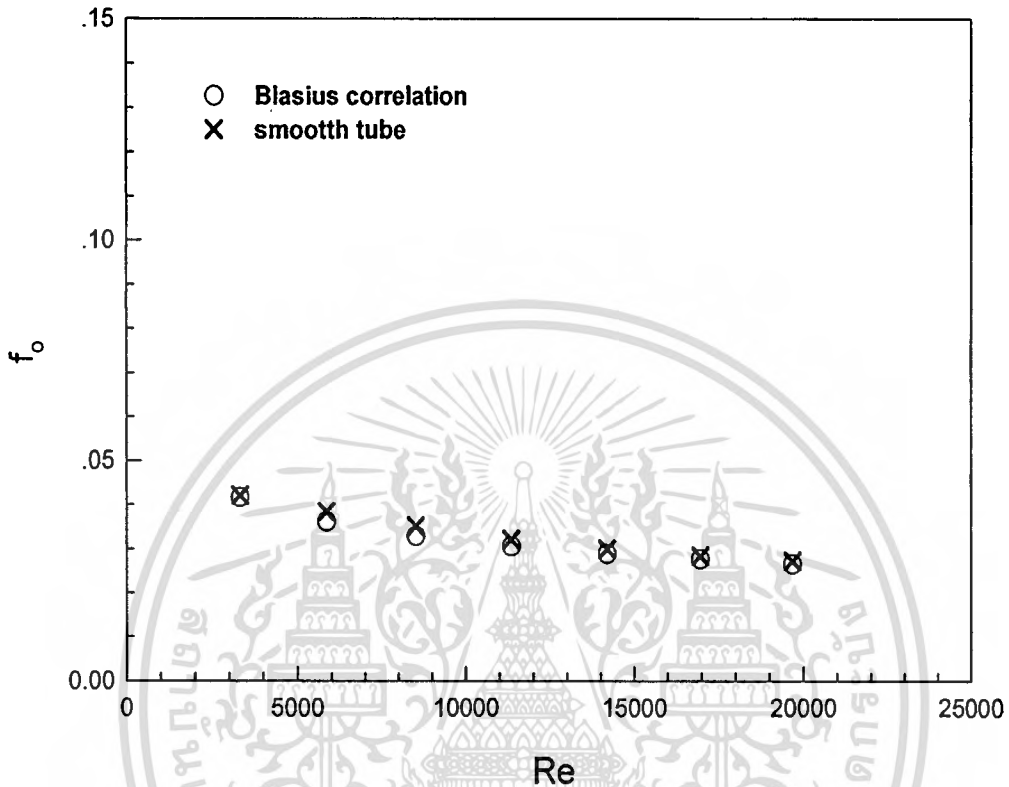
การศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานความเสียดทานในท่อผิวเรียบแล้วนำมาเปรียบเทียบกับสมการจากงานในอดีต เพื่อพิจารณาถึงผลการทดสอบว่ามีค่าความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re ของท่อผิวเรียบ ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนพบว่าผลการทดสอบท่อผิวเรียบมีค่า Nu มากกว่าผลที่ได้จากสหพันธ์ของ Petukhov ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ Re กรณีท่อผิวเรียบ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re ของท่อผิวเรียบ ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนพบว่าผลการทดสอบท่อผิวเรียบค่า f ที่ได้จะมีค่ามากกว่าสหพันธ์ของ Blasius ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re กรณีท่อผิวเรียบ

จากการทดสอบท่อผิวเรียบเทียบกับสมการจากงานในอดีตพบว่า ผลของค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า Re ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า f จะมีค่าลดลงเล็กน้อยตาม Re ที่เพิ่มขึ้น และผลของค่า Nu และ f จะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันกับสมการที่ใช้เปรียบเทียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

สมการที่ใช้เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลส์ (Nu)

Petukhov correlation

$$Nu = \frac{Re_D \cdot Pr(f/8)}{[1.07 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)\sqrt{f/8}] \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^n}$$

$n = 0$ สำหรับเงื่อนไขของ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ หรือของไหลที่เป็นก๊าซชนิดต่างๆ

$n = 0.11$ สำหรับกระบวนการทำให้ของเหลวร้อนขึ้น ($T_s > T_b$)

$n = 0.25$ สำหรับกระบวนการทำให้ของเหลวเย็นลง ($T_s < T_b$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ของหน่วยงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

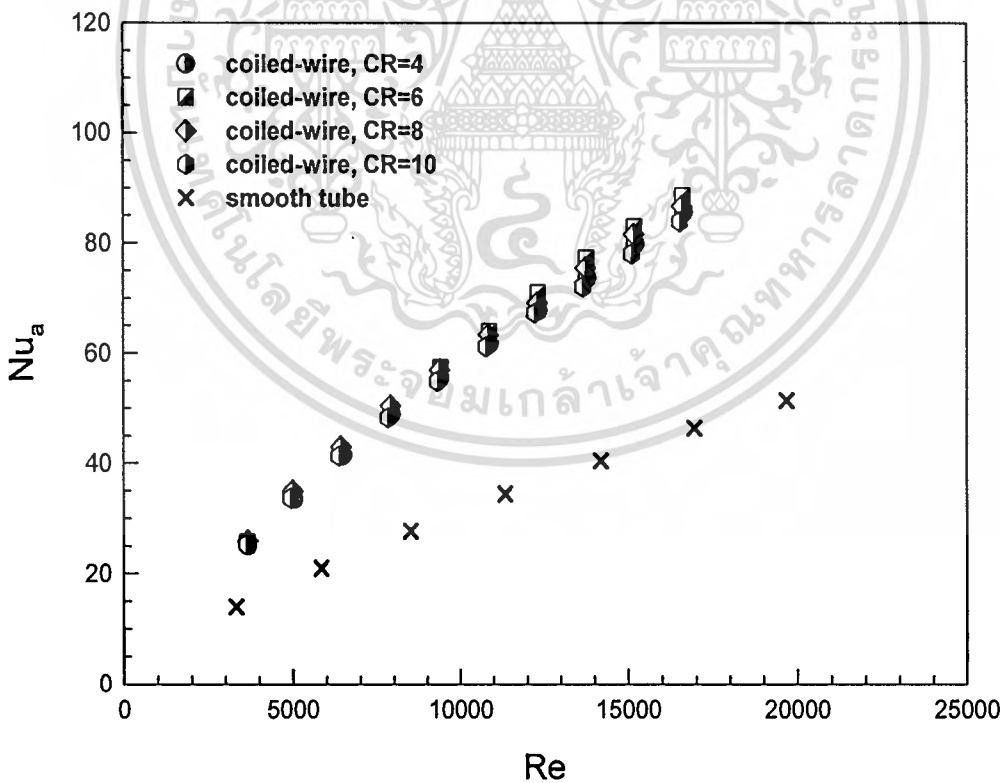
สมการที่ใช้เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f)

Blasius correlation

$$f = 0.316 Re^{-0.25}$$

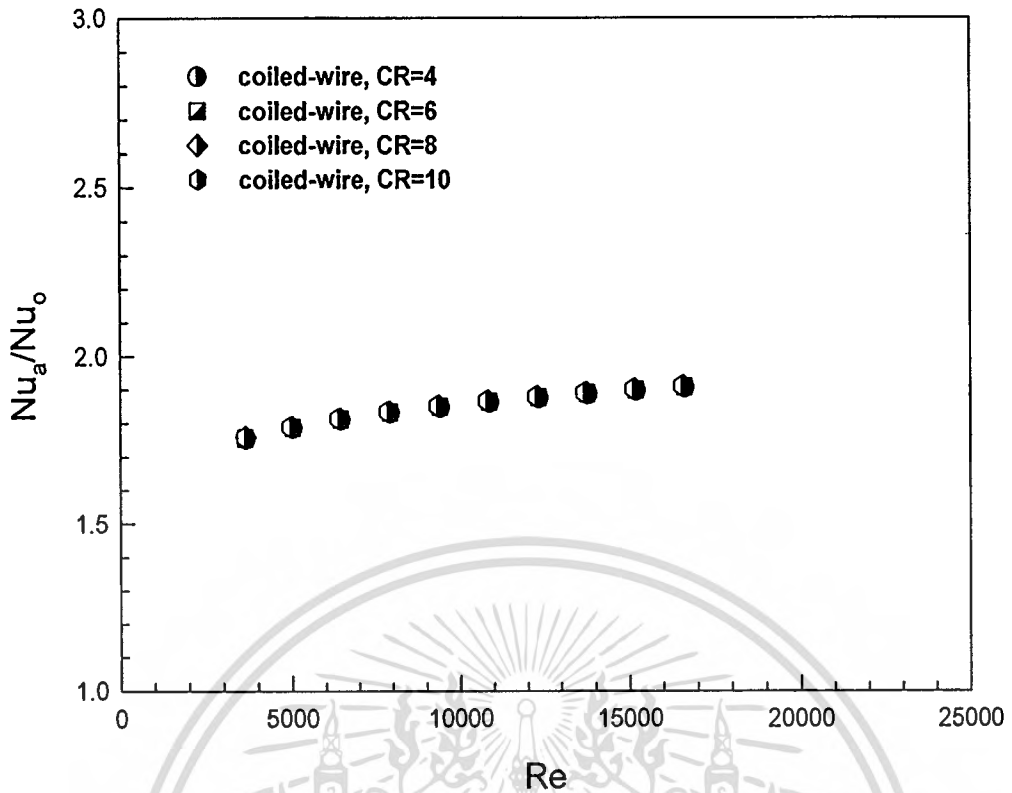
5.2 ผลการทดสอบกรณีใส่ลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนกรณีใส่ลวดขนาดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าการใส่ลวดที่ค่า CR = 4, 6, 8, และ 10 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน (รูปที่ 5.3) ซึ่งดูได้จากค่าอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน (Nu_a/Nu_o) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นประมาณ 180% (รูปที่ 5.4) เมื่อผลของการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นแต่ผลกระทบที่เกิดจากการใส่ลวดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบ (รูปที่ 5.5) ในกรณีลวดที่ค่า CR = 4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะสูงสุด เนื่องจากผลของจำนวนเกลียวของลวดที่มีจำนวนมากที่สุดทำให้เกิดแรงต้านบริเวณผิวของลวดที่อยู่บริเวณผิวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะสูงกว่าท่อผิวเรียบประมาณ 17 เท่า (รูปที่ 5.6) และลดลงที่ค่า CR = 6, 8 และ 10 ตามลำดับ

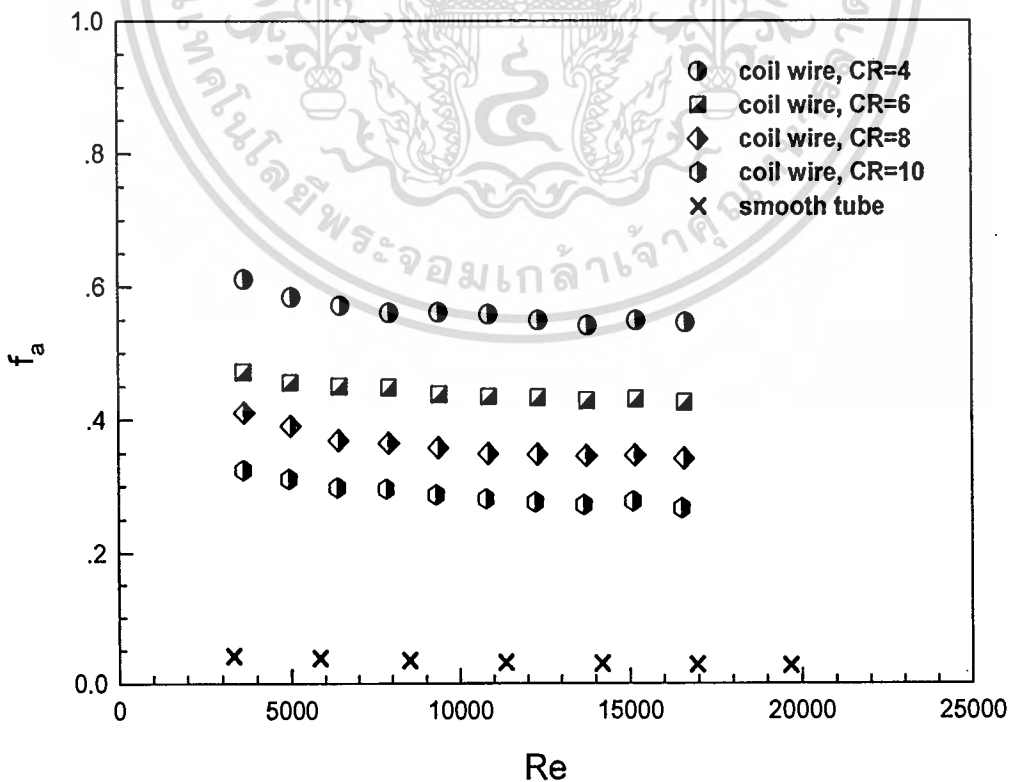


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขนาดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

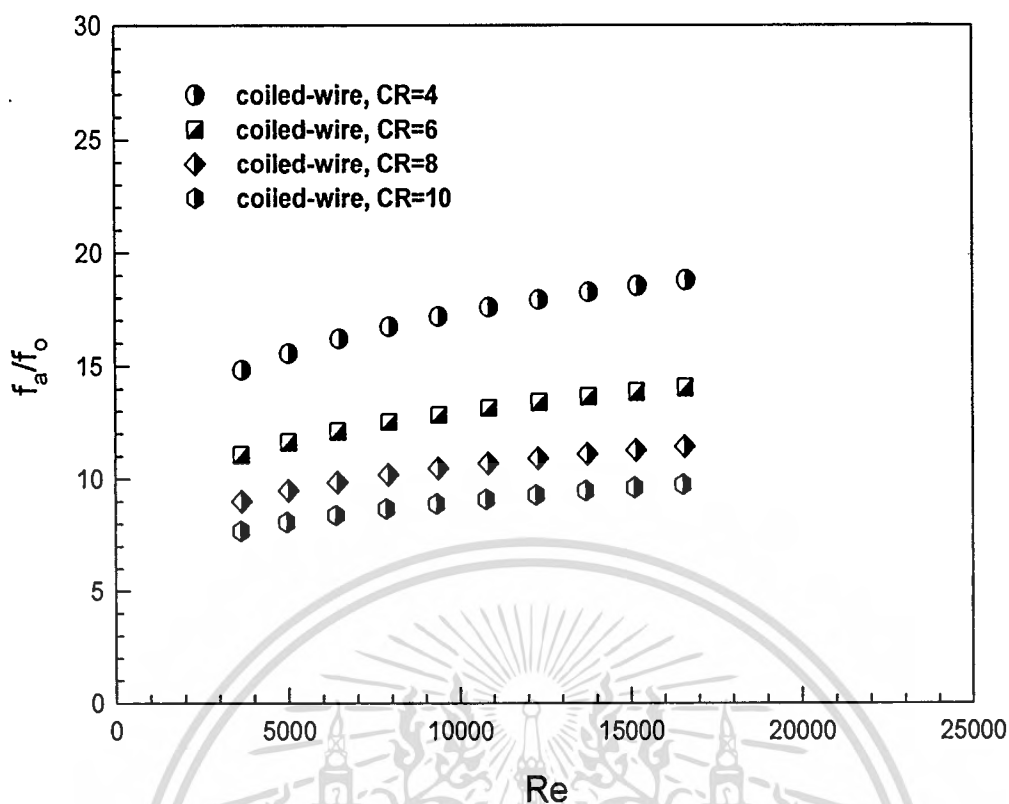


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

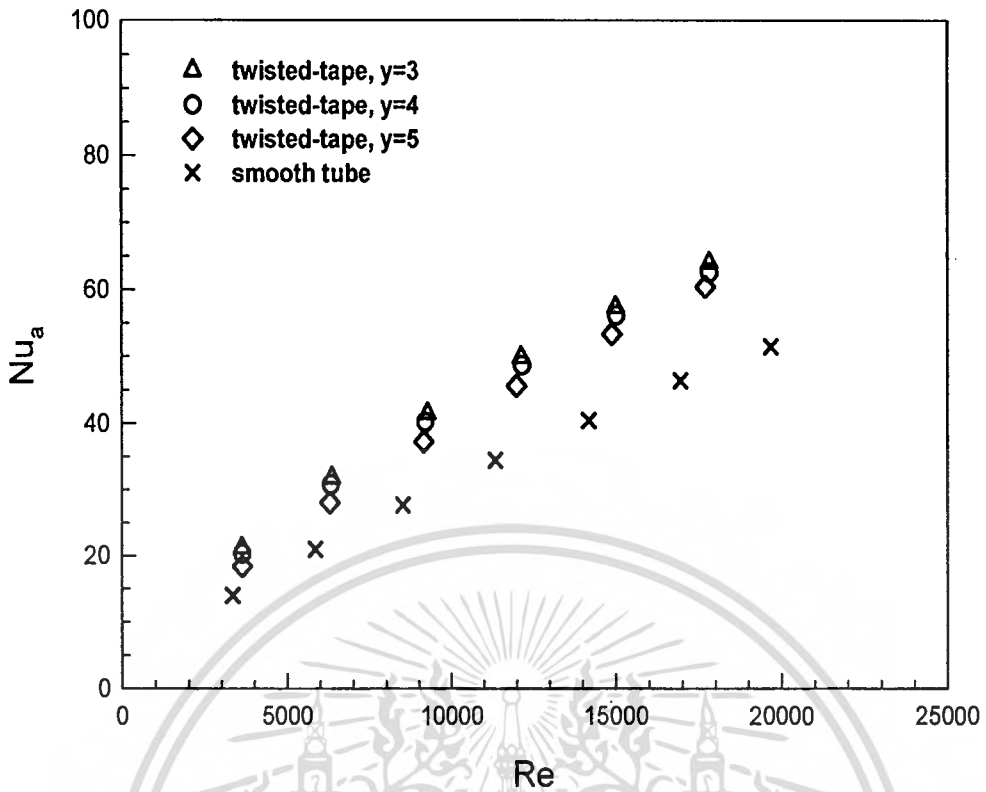
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



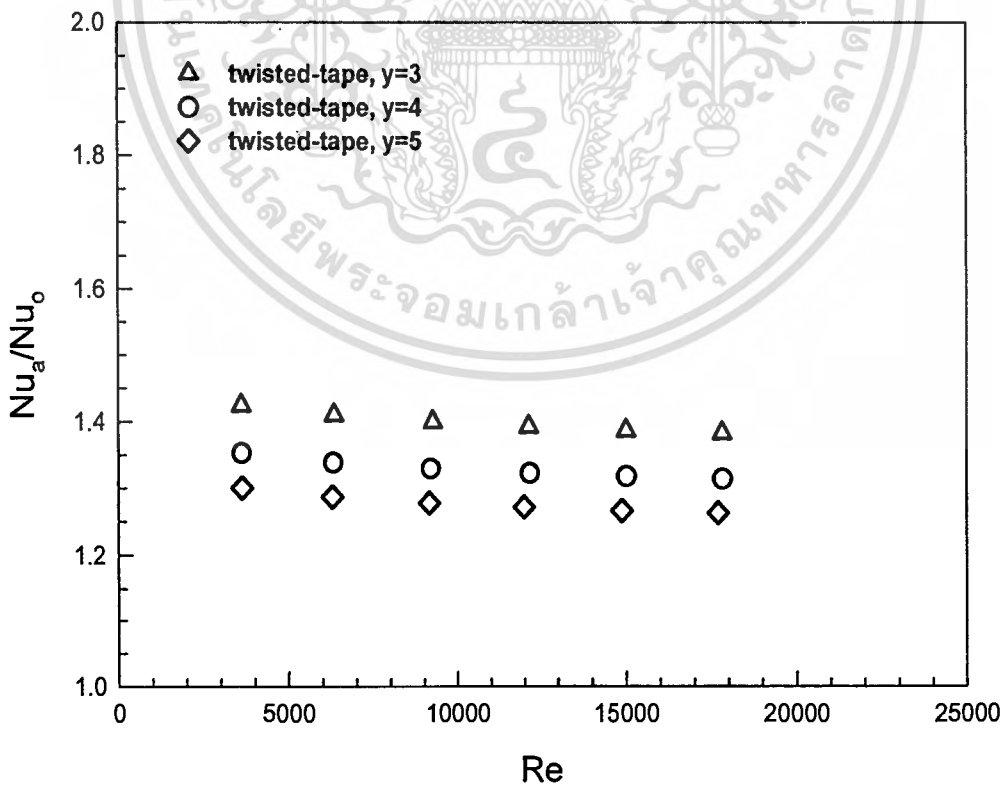
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

5.3 ผลการทดสอบกรณีใส่ไบบิด

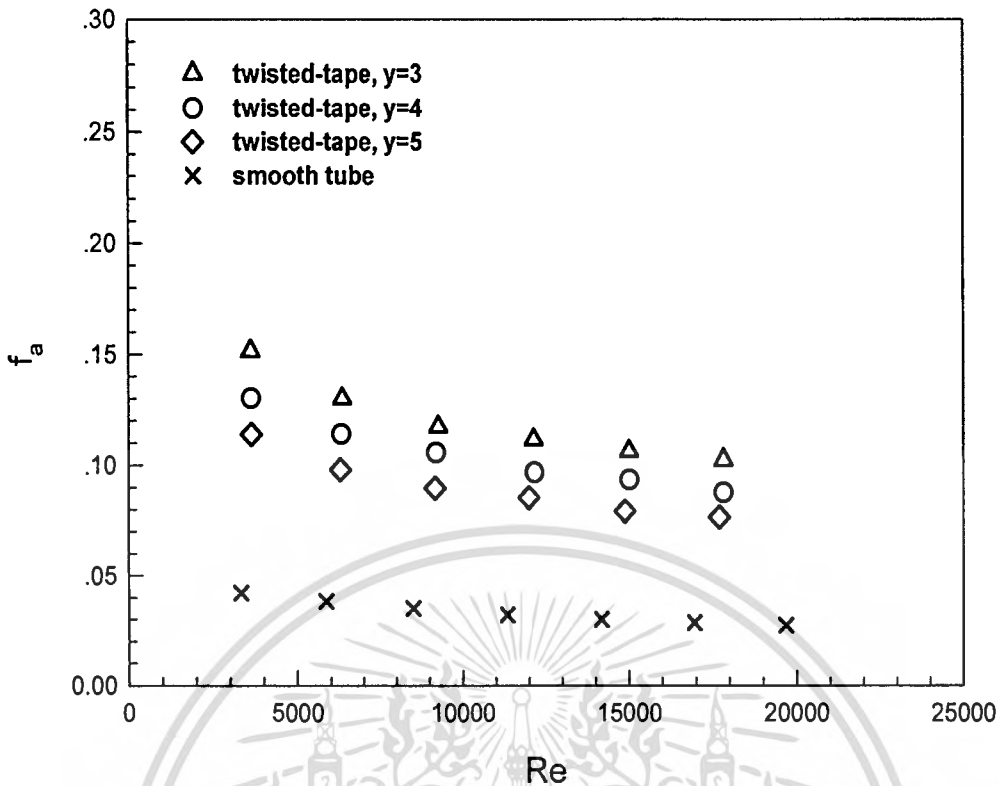
จากผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนกรณีใส่ไบบิดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าการใส่ไบบิดที่ค่า $y = 3$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ส่วนไบบิดที่ค่า $y = 4$ และ 5 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงตามลำดับ (รูปที่ 5.7) ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน (Nu_o/Nu_o) ของ $y = 3$ จะเพิ่มขึ้นประมาณ 140% โดยไบบิดที่ค่า $y = 4$ และ 5 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงประมาณ 133% และ 128% ตามลำดับ (รูปที่ 5.8) จากค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นโดยการใส่ไบบิดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบ (รูปที่ 5.9) ซึ่งในกรณีใส่ไบบิดที่ค่า $y = 3$ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะสูงสุด เนื่องจากผลของจำนวนรอบของการบิดมีค่ามากที่สุดทำให้เกิดผลของแรงต้านจากการหมุนวนของอากาศผ่านไบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีไบบิดใส่อยู่ภายใน โดยผลจะสูงกว่าท่อผิวเรียบประมาณ 3.6 เท่า (รูปที่ 5.10) และลดลงที่ค่า $y = 4$ และ 5 ตามลำดับ



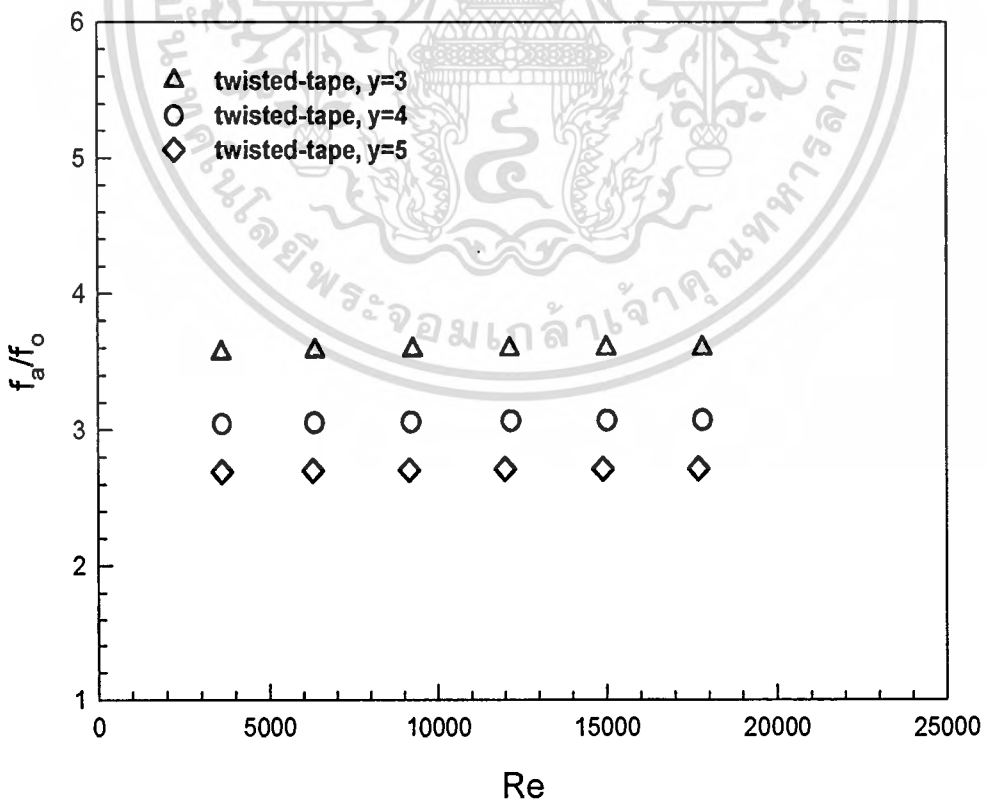
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ Re กรณีใส่ไบบิตภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_0 กับ Re กรณีใส่ไบบิตภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ไบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_0 กับ Re กรณีใส่ไบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ความร้อน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดสอบกรณีใส่ลวดขดร่วมกับไบบิต

ในการศึกษาการใส่ลวดขดร่วมกับไบบิตในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการนำศึกษาผลที่ได้จากการทดลองการใส่ลวดขด และการใส่ไบบิตมาอ้างอิง โดยวิธีการใส่ลวดขดร่วมกับบิตที่ทำทดลองจะแบ่งออก 3 กรณี ดังนี้

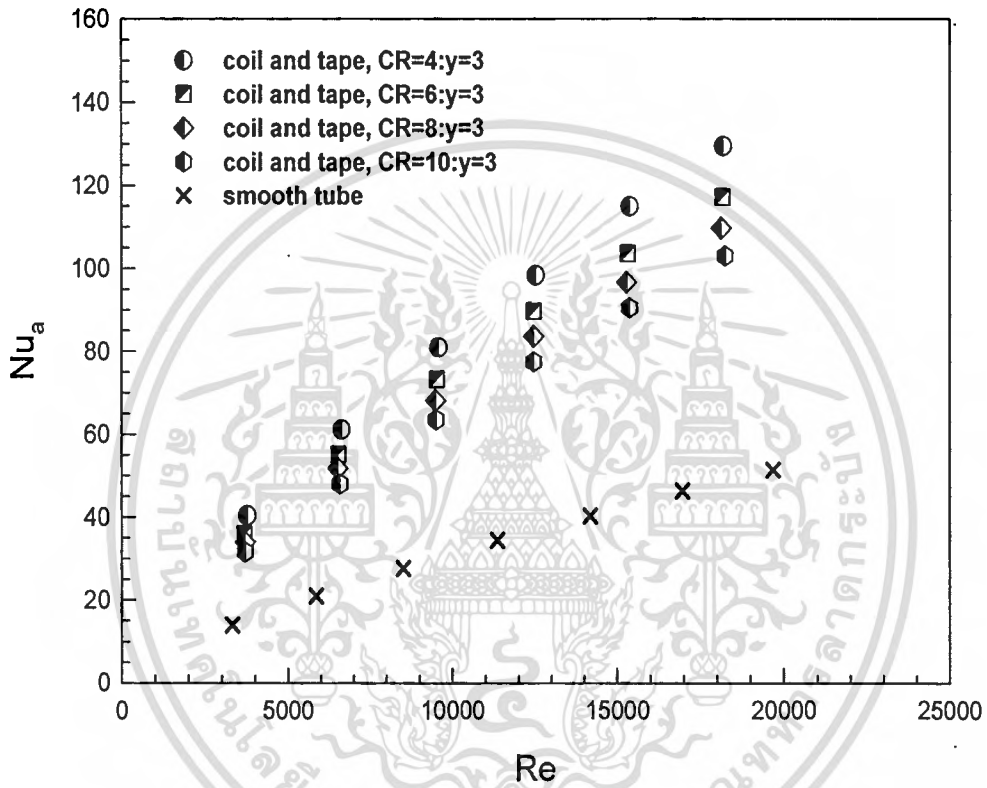
กรณีที่ 1 เป็นการศึกษาผลจากการใส่ไบบิตที่ค่า $y = 3$ ในลวดขดที่ค่า $CR = 4, 6, 8$ และ 10 จากทดลองพบว่าเมื่อทำการใส่ลวดขดร่วมกับไบบิตที่ค่า $CR: y = 4: 3$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และลดลงที่ค่า $CR = 6: 3, 8: 3$ และ $10: 3$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.11) โดยผลของค่า $CR: y = 4: 3$ ที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของลวดขดที่ก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศบริเวณด้านหลังของเส้นลวดที่มีจำนวนเกลียวมากที่สุดผสมกับการอากาศไหลผ่านไบบิต ก่อให้เกิดการหมุนวนส่งผลให้ชั้นขอบเขตถูกทำลายลงทำให้อุณหภูมิที่ผิวท่อต่ำลง เมื่อวิเคราะห์ในด้านการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน (Nu_a/Nu_o) ผลของค่า $CR: y = 4: 3$ จะเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบถึง 270% ส่วนผลของค่า $CR: y = 6: 3, 8: 3$ และ $10: 3$ เท่ากับ 240%, 230% และ 210% ตามลำดับ (รูปที่ 5.12) แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ห้ด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการใส่ชิ้นงานแบบลวดขดและไบบิต ปรากฏว่าเมื่อทำการใส่ชิ้นงานแบบลวดขดร่วมกับไบบิตที่ค่า $CR: y = 4: 3$ ผลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะสูงมากและลดลงที่ค่า $CR: y = 6: 3, 8: 3$ และ $10: 3$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.13) เนื่องจากผลของแรงต้านภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการประทะระหว่างอากาศกับชิ้นงานทดสอบ โดยผลของการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f_a/f_o) ที่ค่า $CR: y = 4: 3, 6: 3, 8: 3$ และ $10: 3$ มีค่าประมาณ 36, 26, 21 และ 17 เท่าของท่อผิวเรียบ (รูปที่ 5.14)

กรณีที่ 2 เป็นการศึกษาผลจากการใส่ไบบิตที่ค่า $y = 4$ ในลวดขดที่ค่า $CR = 4, 6, 8$ และ 10 จากทดลองพบว่าเมื่อทำการใส่ลวดขดร่วมกับไบบิตที่ค่า $CR: y = 4: 4$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดและลดลงที่ค่า $CR = 6: 4, 8: 4$ และ $10: 4$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.15) แต่ค่าการถ่ายเทความร้อนจะน้อยกว่ากรณีที่ 1 มีผลเนื่องจากชิ้นงานแบบไบบิต (รูปที่ 5.7) เมื่อวิเคราะห์ในด้านการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน (Nu_a/Nu_o) ผลของค่า $CR: y = 4: 4$ จะเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบถึง 260% ส่วนผลของค่า $CR: y = 6: 4, 8: 4$ และ $10: 4$ เท่ากับ 230%, 220% และ 210% ตามลำดับ (รูปที่ 5.16) เมื่อทำการวิเคราะห์ทางด้านสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน พบว่ากรณีค่า $CR: y = 4: 4$ ผลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะสูงสุดและลดลงที่ค่า $CR: y = 6: 4, 8: 4$ และ $10: 4$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.17) ส่วนผลของการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f_a/f_o) ที่ค่า $CR: y = 4: 4, 6: 4, 8: 4$ และ $10: 4$ มีค่าประมาณ 33, 24, 19 และ 16 เท่าของท่อผิวเรียบ (รูปที่ 5.18)

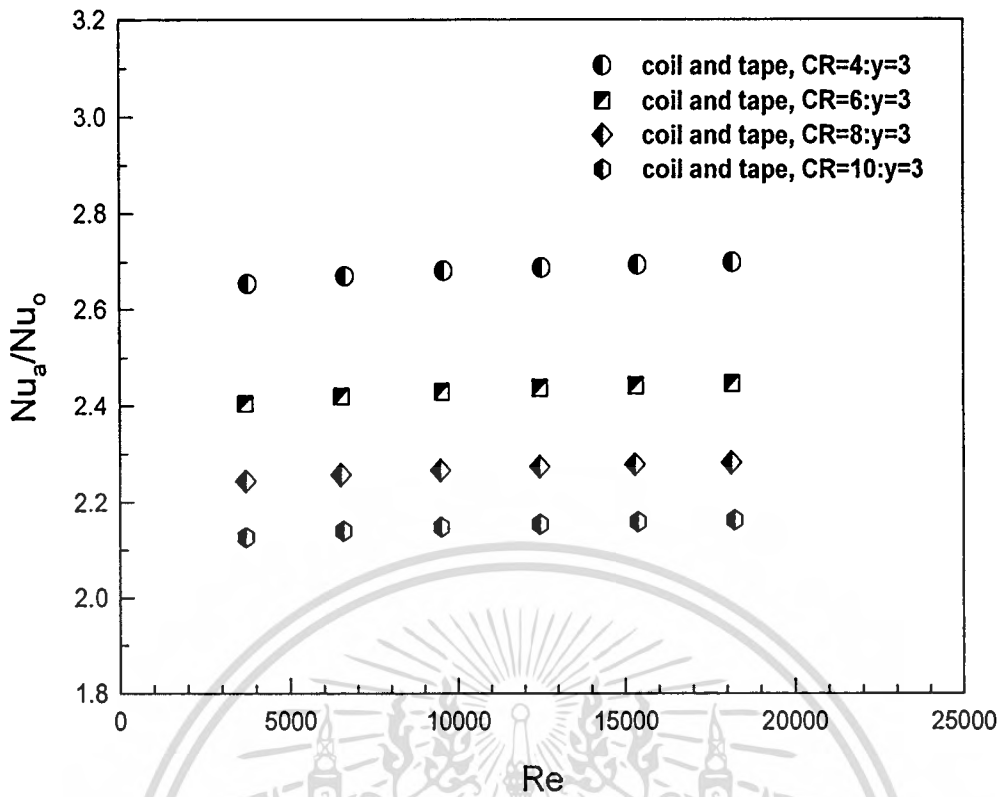
กรณีที่ 3 เป็นการศึกษาผลจากการใส่ไบบิตที่ค่า $y = 5$ ในลวดขดที่ค่า $CR = 4, 6, 8$ และ 10 จากทดลองพบว่าเมื่อทำการใส่ลวดขดร่วมกับไบบิตที่ค่า $CR: y = 4: 5$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดและลดลงที่ค่า $CR = 6: 5, 8: 5$ และ $10: 5$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.19) แต่ค่าการถ่ายเทความร้อนจะน้อยกว่ากรณีที่ 2 มีผลเนื่องจากชิ้นงานแบบไบบิต (รูปที่ 5.7) เมื่อวิเคราะห์ในด้านการเพิ่มขึ้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

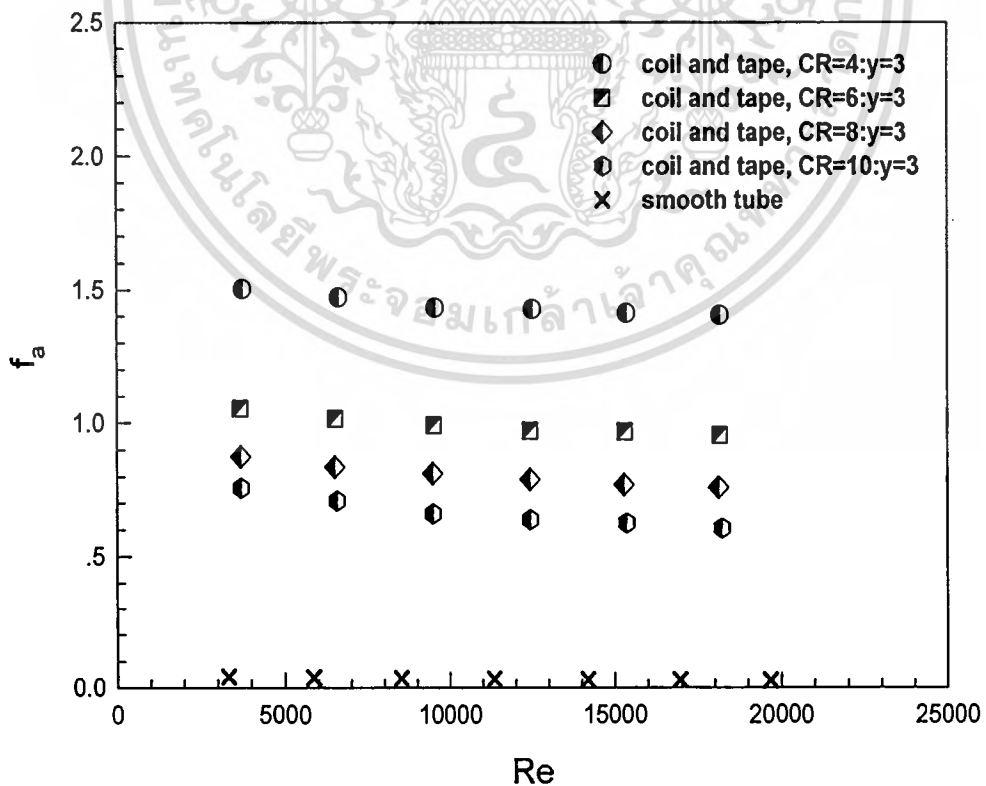
การถ่ายเทความร้อน (Nu_a/Nu_o) ผลของค่า CR: $y = 4: 5$ จะเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบถึง 250% ส่วนผลของค่า CR: $y = 6: 5, 8: 5$ และ $10: 5$ เท่ากับ 230%, 210% และ 200% ตามลำดับ (รูปที่ 5.20) เมื่อทำการวิเคราะห์ทางด้านสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากการทดลองพบว่ากรณีค่า CR: $y = 4: 5$ ผลของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะสูงสุดและลดลงที่ค่า CR: $y = 6: 5, 8: 5$ และ $10: 5$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.21) ส่วนผลของการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f_a/f_o) ที่ค่า CR: $y = 4: 4, 6: 4, 8: 4$ และ $10: 4$ มีค่าประมาณ 30, 22, 18 และ 15 เท่าของท่อผิวเรียบ (รูปที่ 5.22)



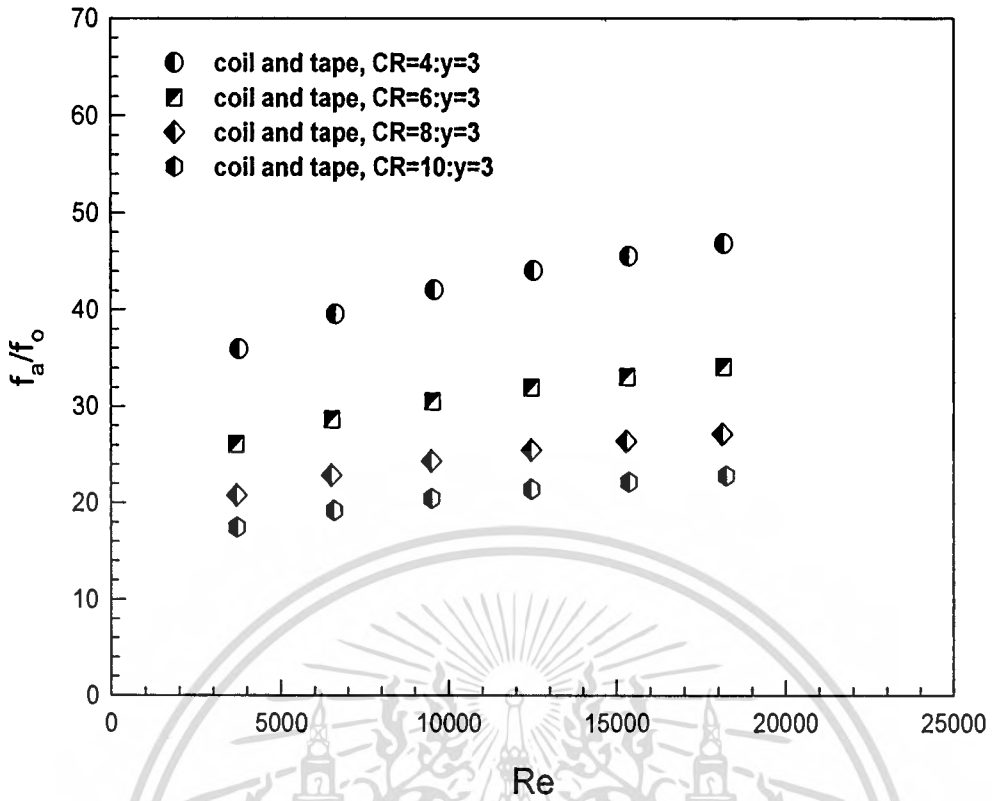
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 3$)



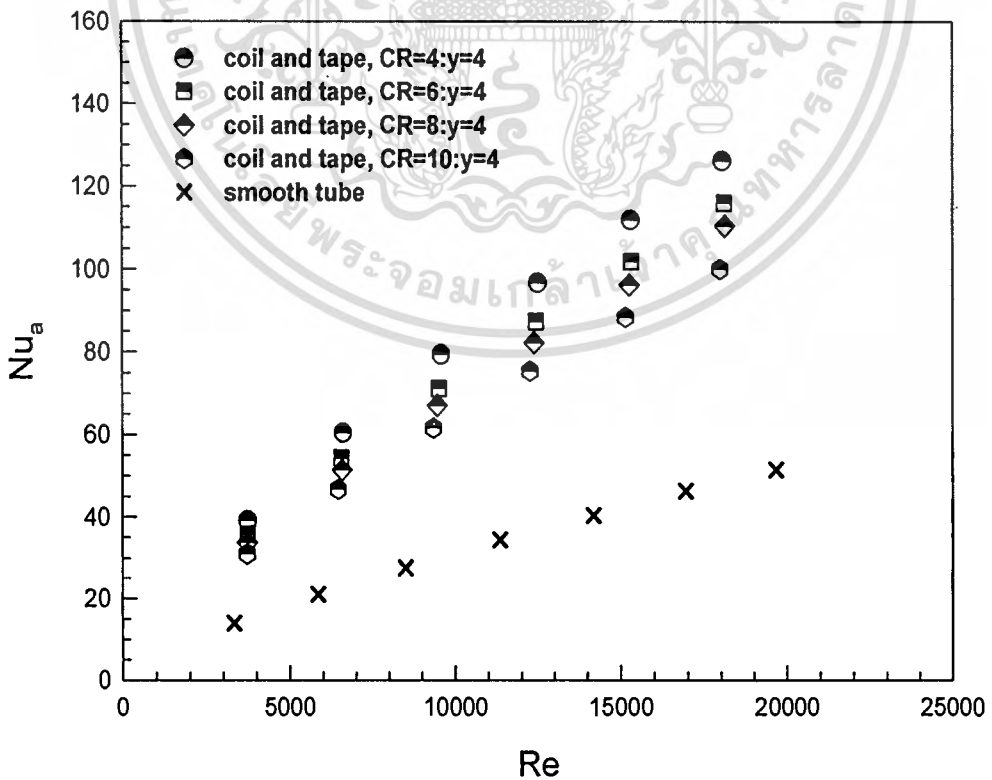
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 3$)



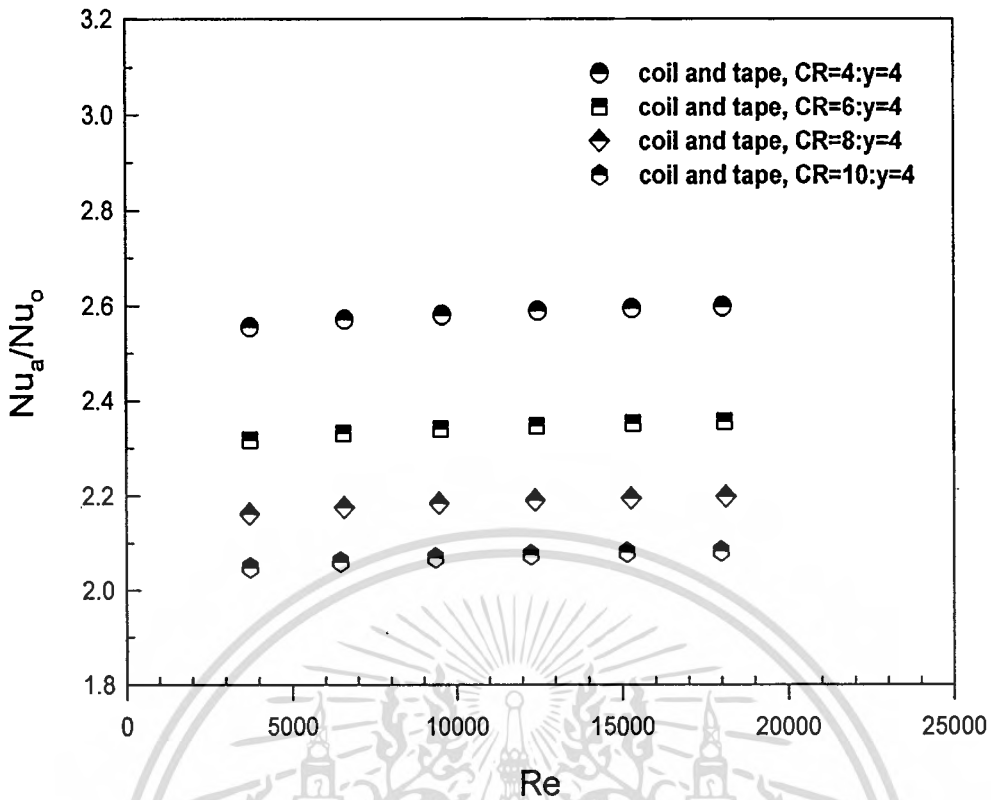
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (กรณีศึกษา $y = 3$)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



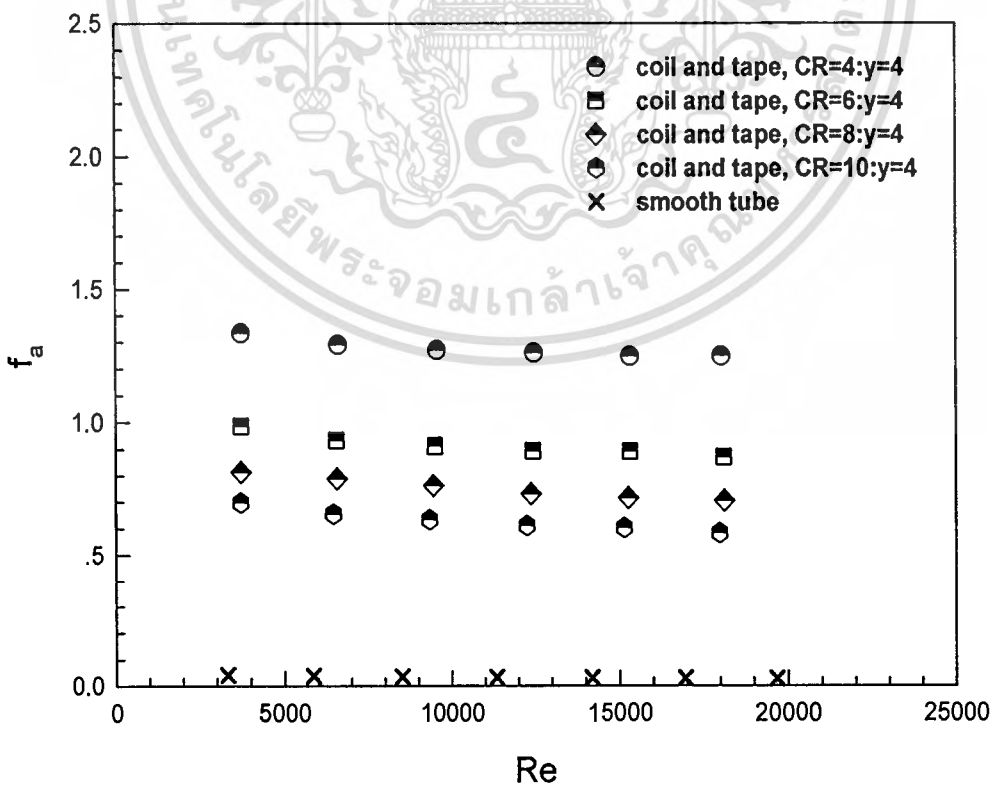
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดคดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 3$)



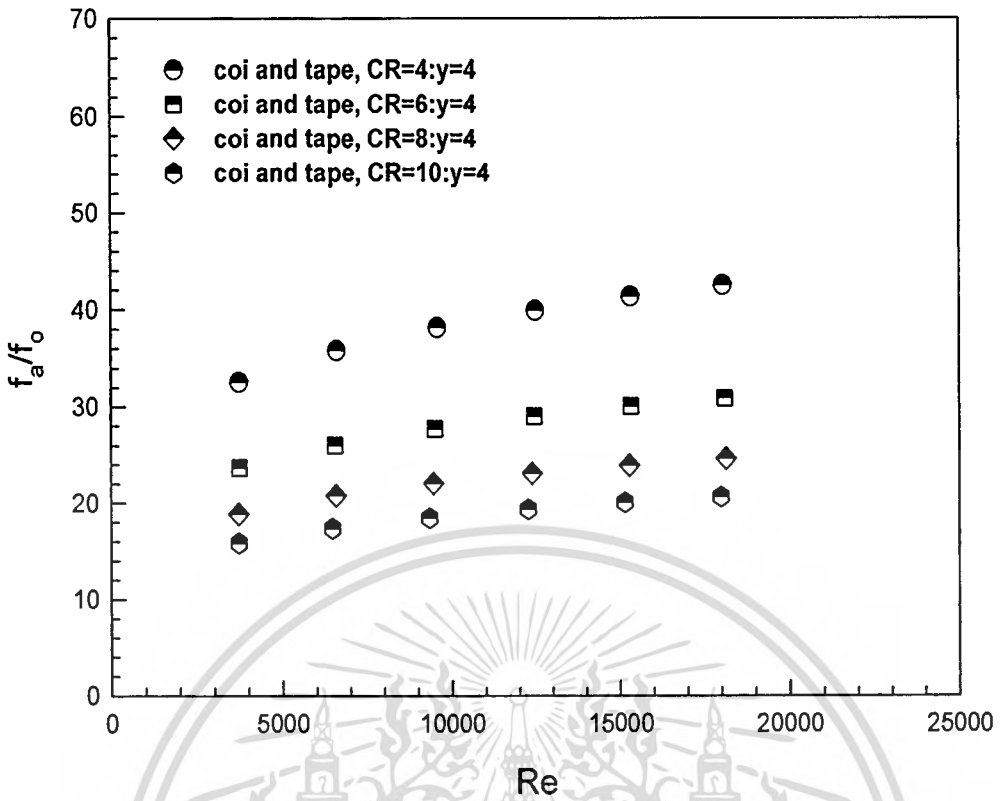
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีใส่ลวดคดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



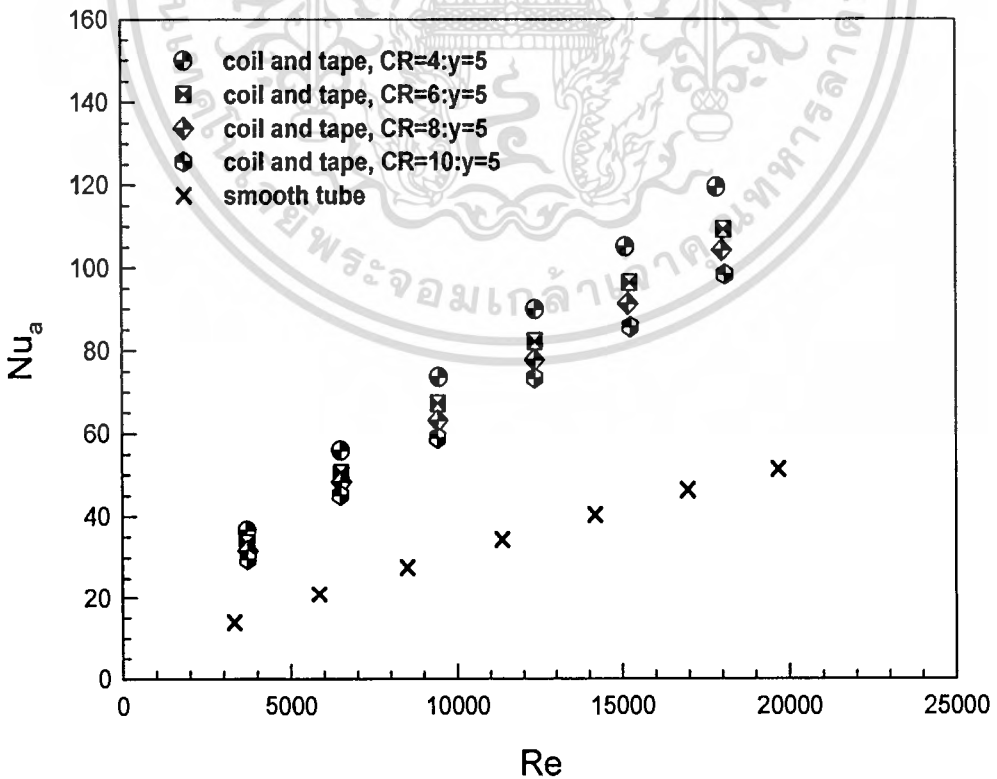
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y=4$)



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (กรณีศึกษา $y=4$)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

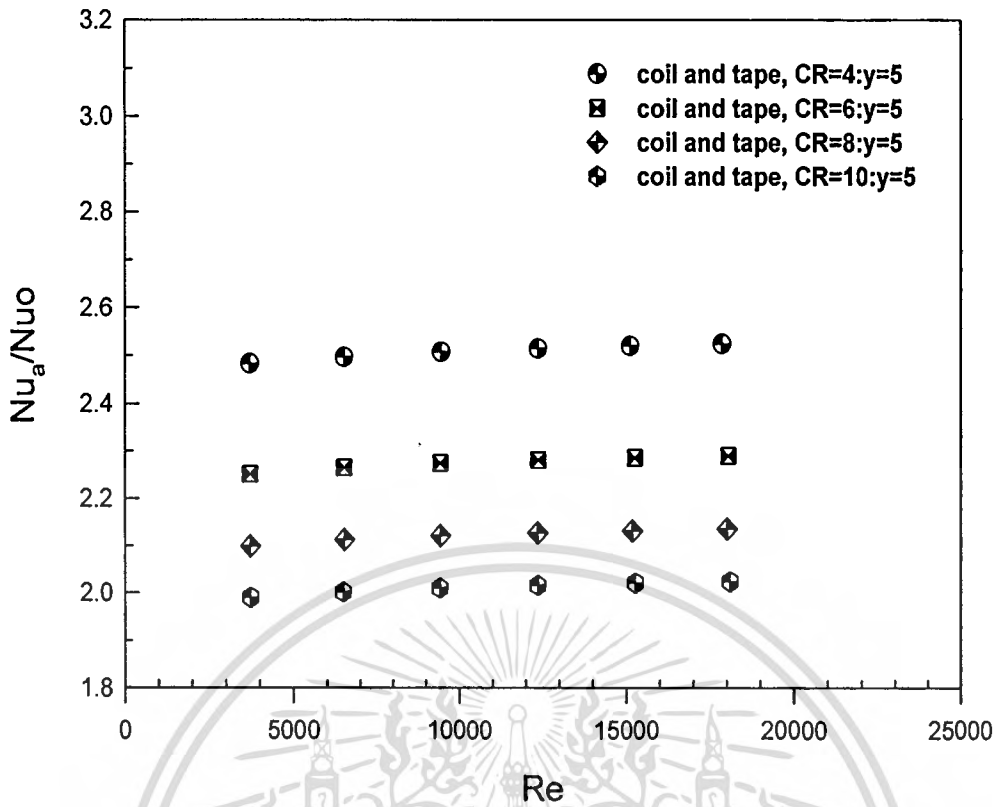


รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 4$)

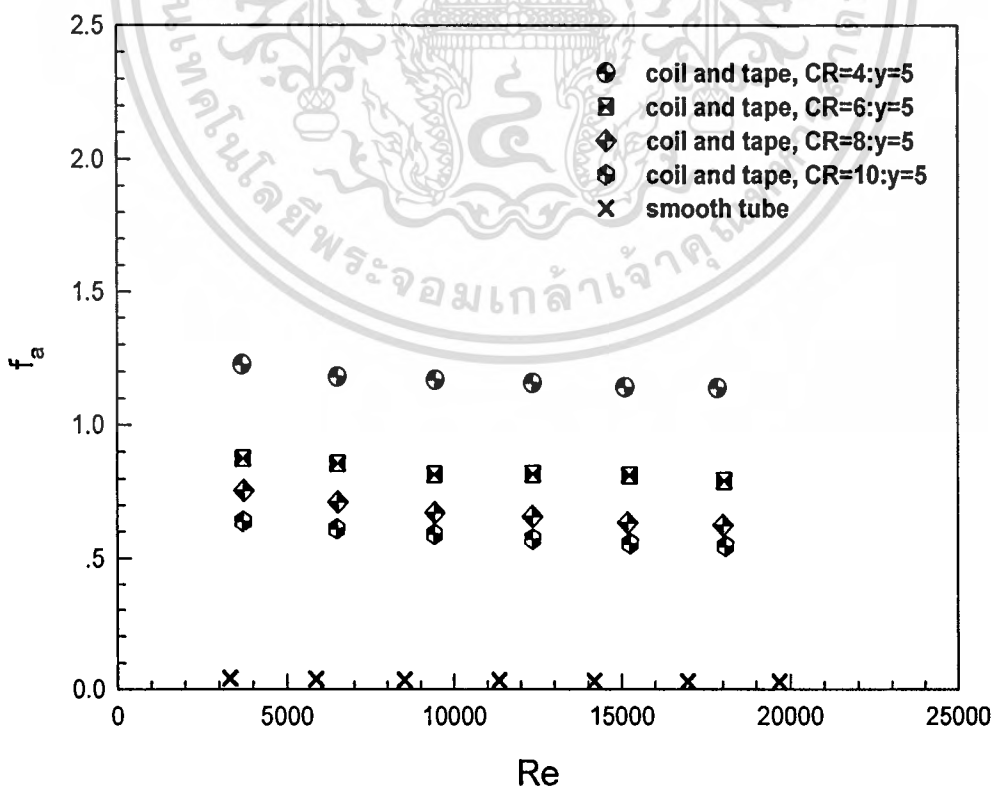


รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



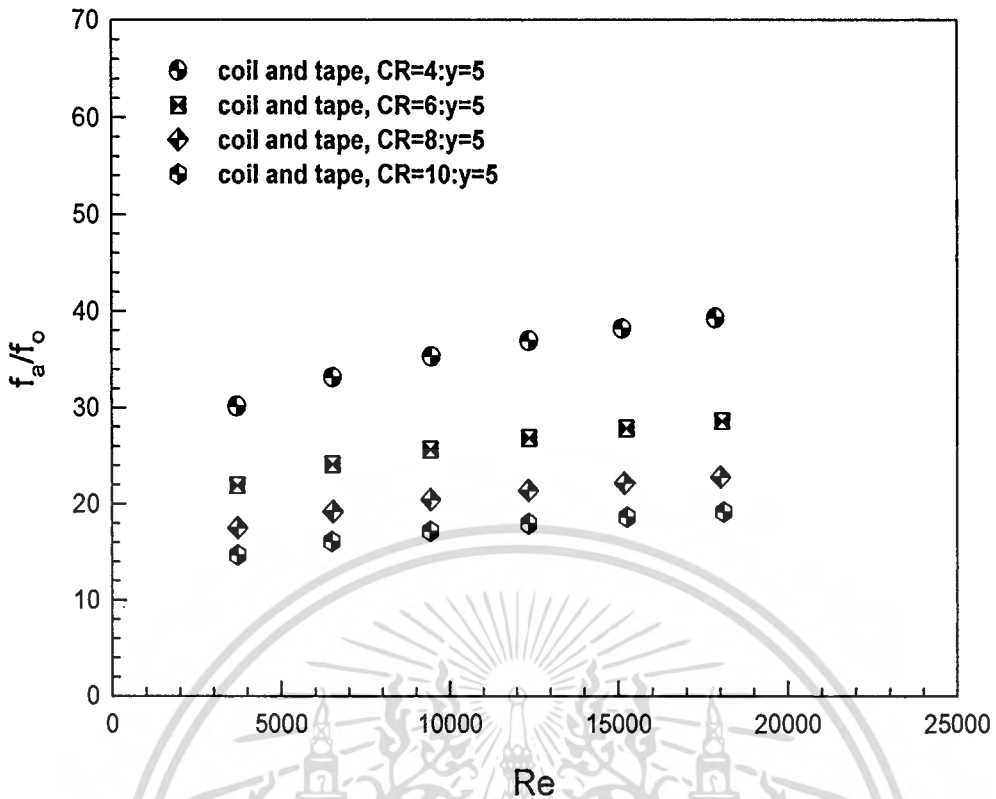
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดคดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 5$)



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re กรณีใส่ลวดคดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (กรณีศึกษา $y = 5$)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิตภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีศึกษา $y = 5$)

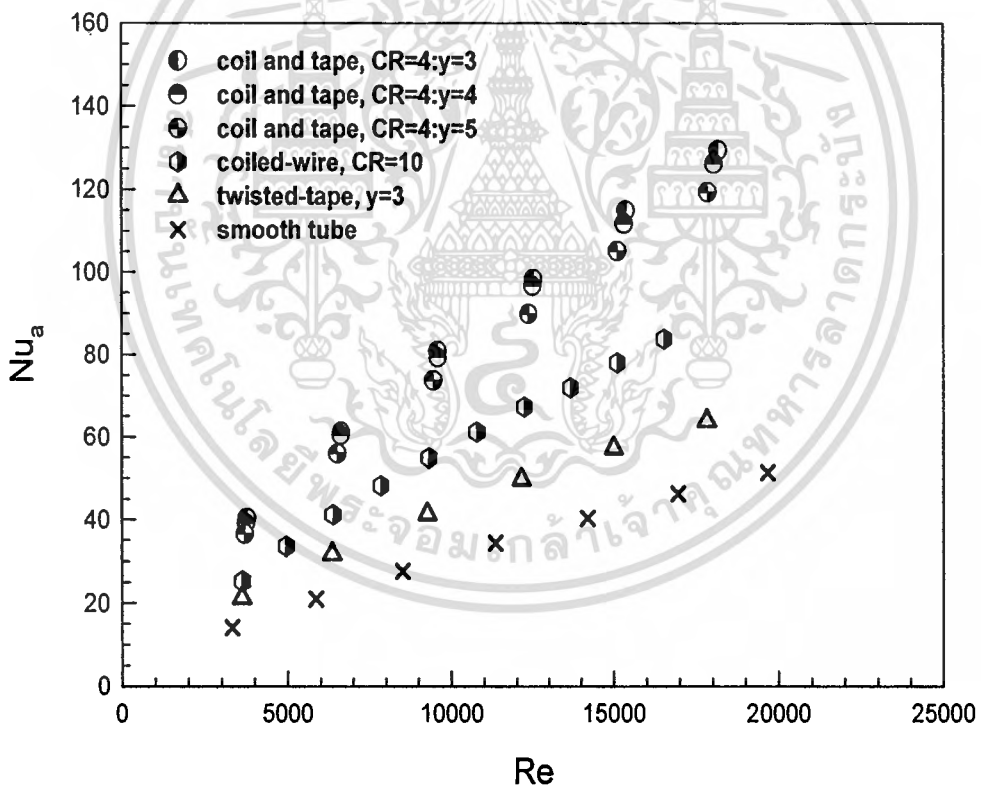
5.5 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ

จากผลการทดลองชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ ประกอบด้วย ลวดขด (coiled-wires) ไบบิต (twisted tapes) และ ลวดขดร่วมกับไบบิต (coils and tapes) ซึ่งทำการศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อน อัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน โดยการนำผลที่ดีที่สุดของชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบมาเปรียบเทียบกัน โดยผลของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Nu) ของชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดและไบบิต (coils and tapes) ที่ค่า $CR: y = 4: 3, 6: 3, 8: 3$ และ $10: 3$ ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบแบบลวดขด (coiled-wire) และแบบไบบิต (twisted tape) ที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในแต่ละกรณี ปรากฏว่าผลของใส่ชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดร่วมกับไบบิตให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดและไบบิตมาก (รูปที่ 5.23) ซึ่งผลของการเพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อน (Nu_a/Nu_o) ของลวดขดร่วมกับไบบิตเพิ่มขึ้นประมาณ 270% แต่ในกรณีของชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดและไบบิตเพิ่มขึ้นประมาณ 180% และ 140% (รูปที่ 5.24) ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบจะเห็นได้ว่าชิ้นงานแบบลวดขดร่วมกับไบบิตจะสูงกว่าลวดขดประมาณ 90% และแบบไบบิตประมาณ 130% ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) ของ

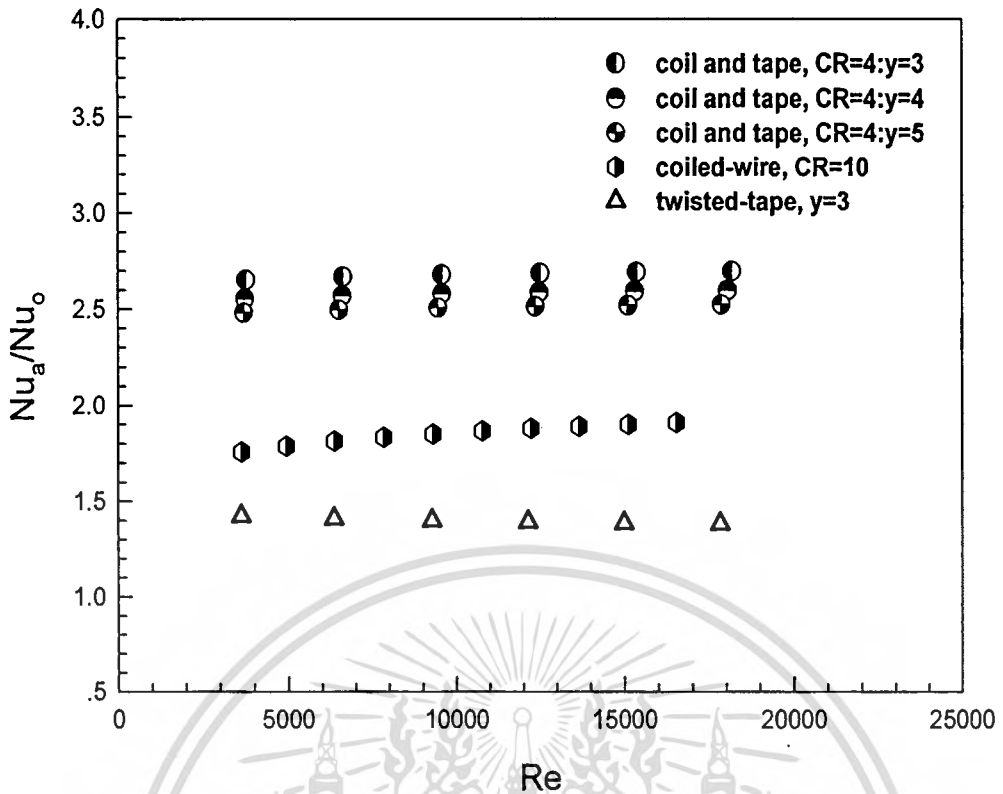
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ ผลปรากฏว่าชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดร่วมกับไบบิตให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 แบบ (รูปที่ 5.25)

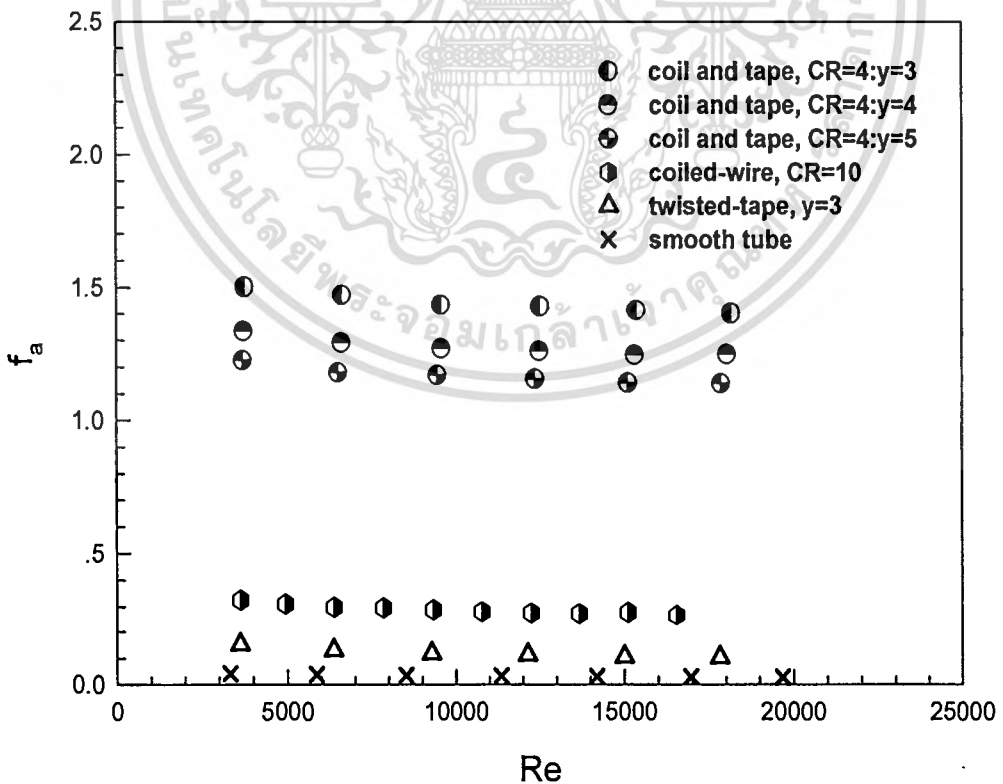
จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะสามารถหาค่า *enhancement efficiency* (η) โดยค่าที่ได้จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ใช้พลังงานขับของปั๊มลมเดียวกับท่อผิวเรียบ ซึ่งผลที่ได้จะทำกรเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ โดยชิ้นงานทดสอบแบบไบบิตจะได้ค่า $\eta = 0.94$ ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำและค่อยๆลดลงที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น ส่วนชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดที่ค่า $CR = 10$ ได้ค่า $\eta = 0.9$ ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับลวดขดแบบอื่นๆ และชิ้นงานแบบลวดขดร่วมกับไบบิตที่ค่า $CR: y = 4: 3$ ให้ค่า $\eta = 0.83$ โดยจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าค่า *enhancement efficiency* ของชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน (รูปที่ 5.23) การใส่ชิ้นงานแบบลวดขดร่วมกับไบบิตในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ชิ้นงานลวดขดหรือไบบิต



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu กับ Re กรณีใส่ลวดขดและไบบิตภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ)



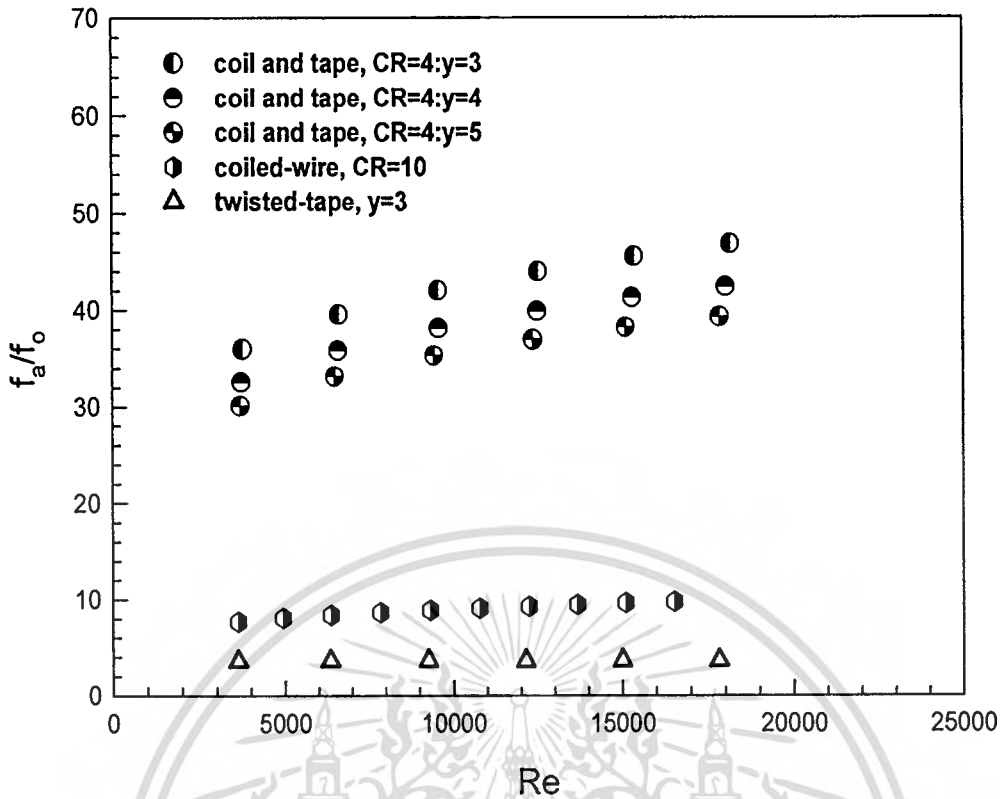
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Nu_a/Nu_o กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ)



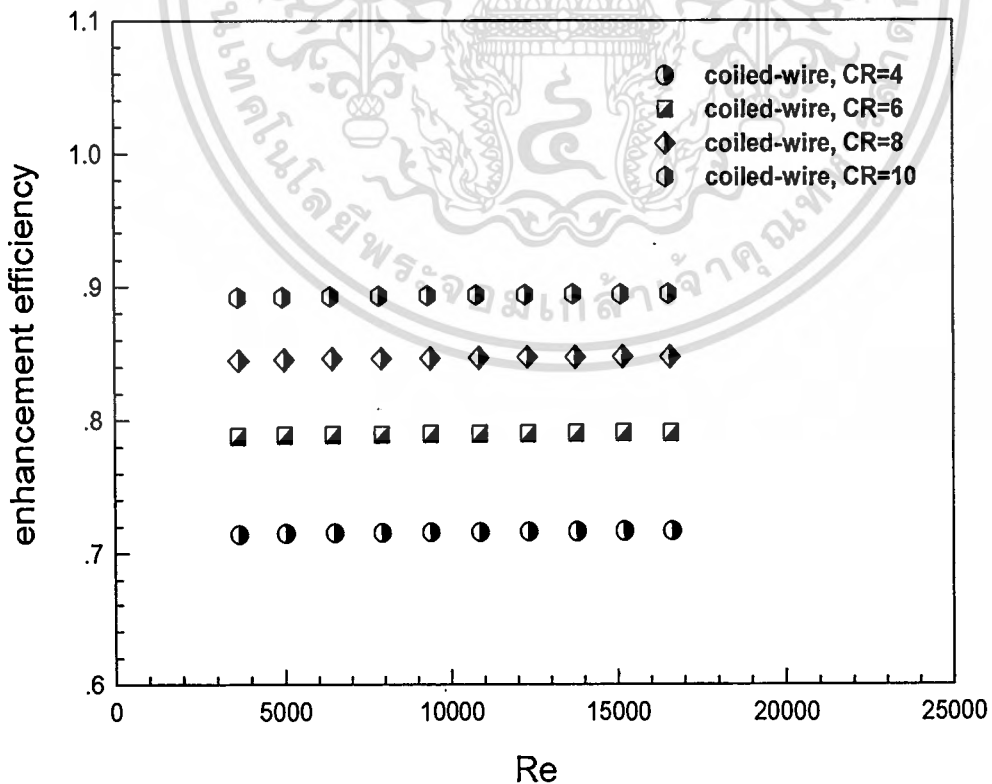
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อ

แลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

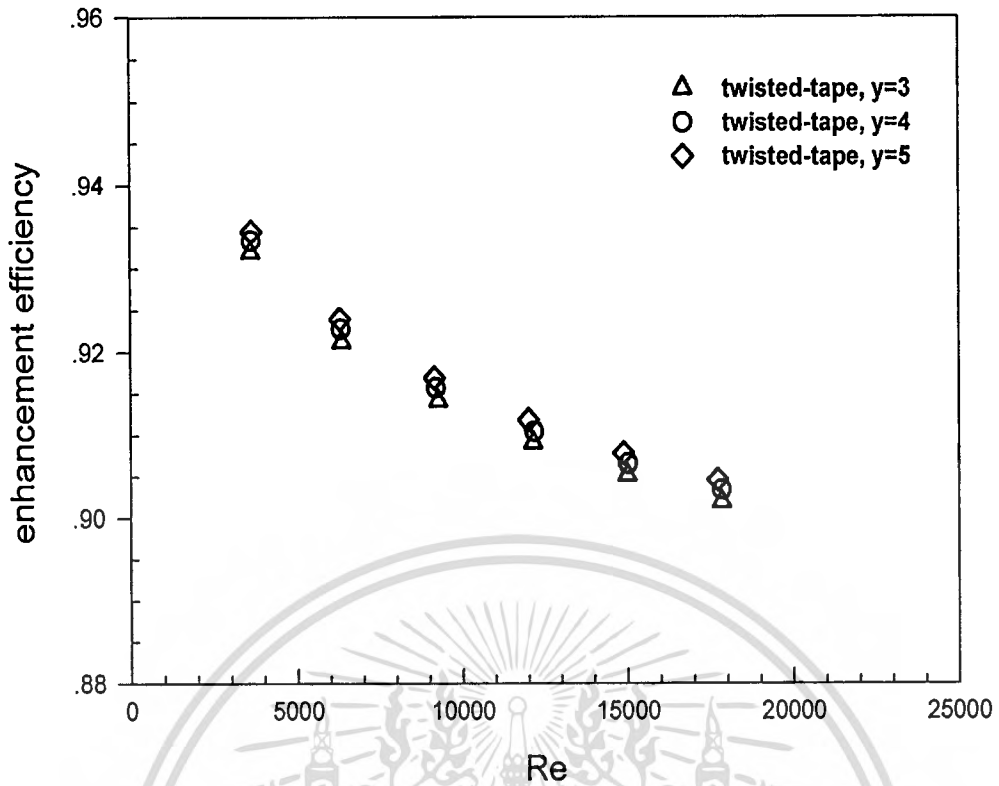


รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f_a/f_0 กับ Re กรณีใส่ลวดขดและใบบิดภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีเปรียบเทียบการใส่ชิ้นงานทั้ง 3 แบบ)

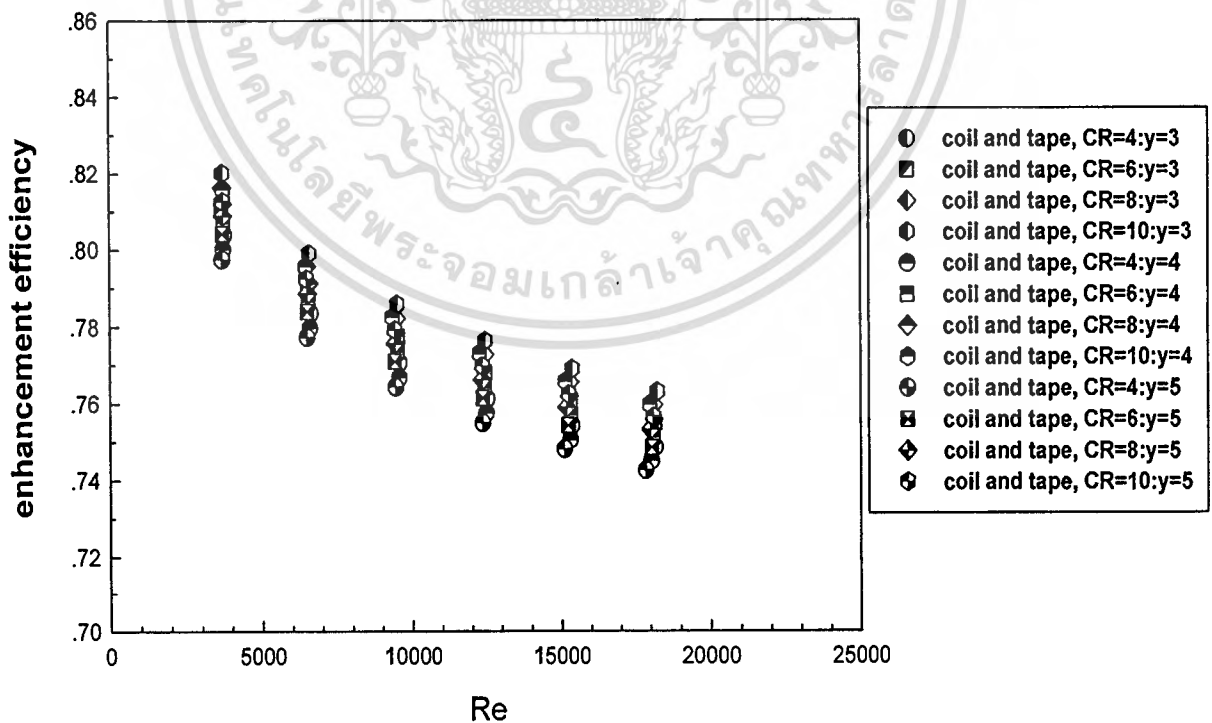


รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $enhancement\ efficiency$ กับ Re กรณีใส่ลวดขดภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง *enhancement efficiency* กับ *Re* กรณีใส่ไบบิตภายในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง *enhancement efficiency* กับ *Re* กรณีใส่ลวดขดและไบบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารภายในท่อกแลกเปลี่ยความร้อนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

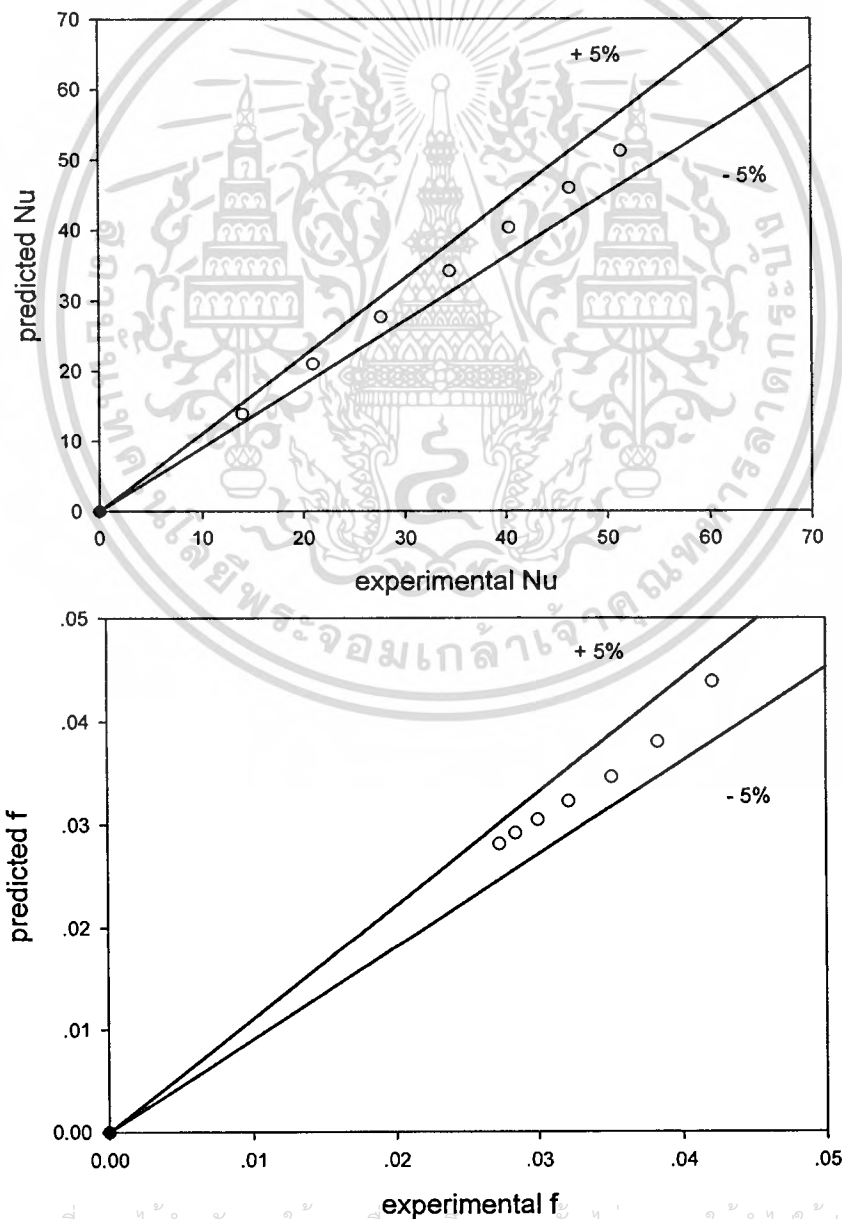
5.6 การสร้างสหสัมพันธ์ของ Nu และ f จากการทดสอบ

5.6.1 กรณีท่อผิวเรียบ (smooth tube)

จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกัน โดยสมการความสัมพันธ์ของท่อผิวเรียบสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu_o = 0.0413 Re_o^{0.735} Pr^{0.4}$$

$$f_o = 0.333 Re_o^{-0.25}$$



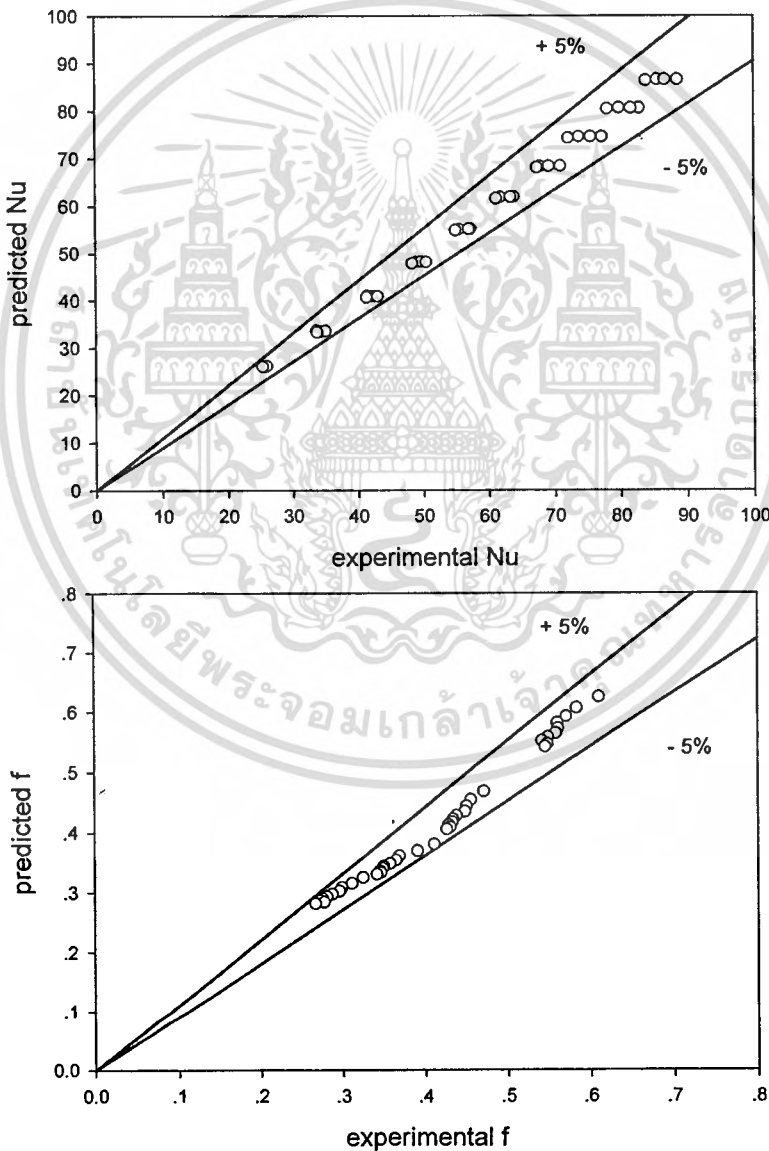
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไข/ใส่ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.30 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีท่อผิวเรียบ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.2 กรณีใส่ลวดขด (coiled-wire)

จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ โดยสมการความสัมพันธ์กรณีใส่ลวดขดสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu_a = 0.046 Re_a^{0.79} Pr^{0.4} CR^{0.0032}$$

$$f_a = 3.648 Re_a^{-0.094} CR^{-0.7153}$$



รูปที่ 5.31 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีใส่ลวดขดภายในท่อ

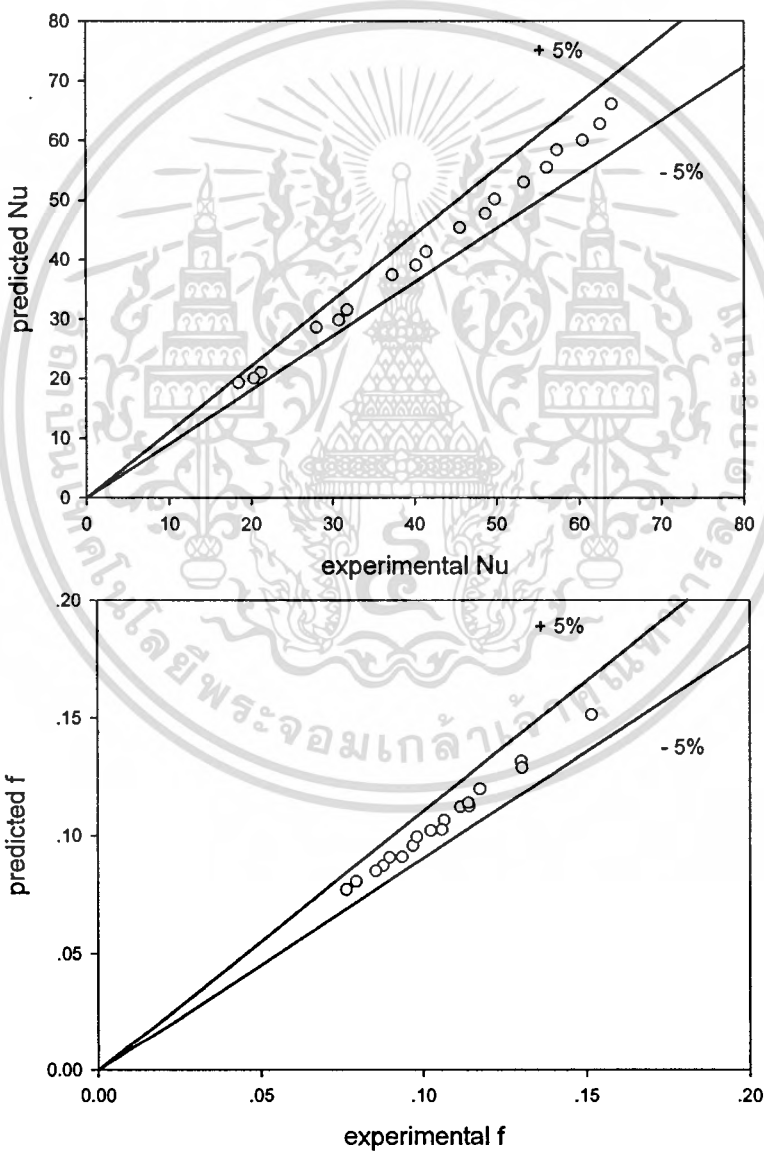
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่กองวิศวกรรมการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 แลกเปลี่ยนความร้อน
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.3 กรณีใส่ไบบิด (twisted-tape)

จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ โดยสมการความสัมพันธ์กรณีใส่ไบบิดสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu_a = 0.0833 Re_a^{0.7166} Pr^{0.4} y^{-0.1783}$$

$$f_a = 2.077 Re_a^{-0.2458} y^{-0.5512}$$



รูปที่ 5.32 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีใส่ไบบิดภายในท่อแลกเปลี่ยน

ความร้อน

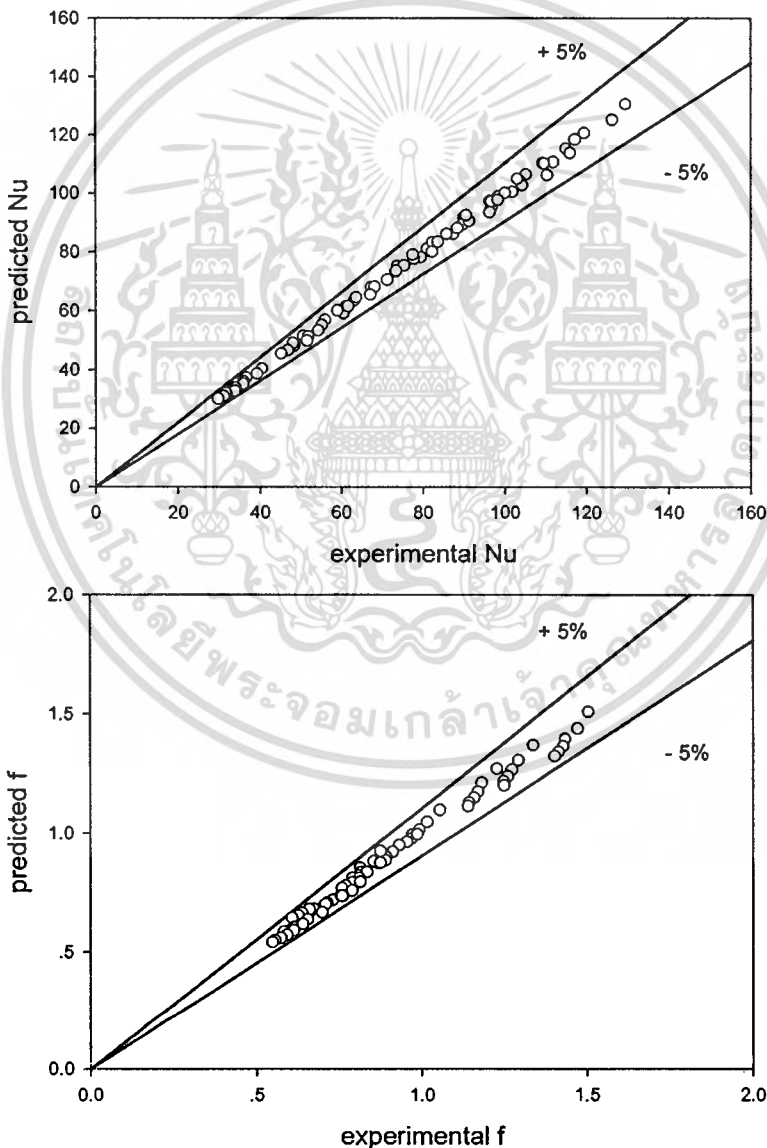
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.4 กรณีสลวดขดร่วมกับไบบิต (coils and tapes)

จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 5 เปอร์เซ็นต์ โดยสมการความสัมพันธ์กรณีสลวดขดร่วมกับไบบิตสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu_a = 0.1616 Re_a^{0.746} Pr^{0.4} CR^{-0.2412} y^{-0.1303}$$

$$f_a = 12.9393 Re_a^{-0.0832} CR^{-0.7868} y^{-0.339}$$



รูปที่ 5.33 การตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu และ f กรณีสลวดขดและไบบิตภายใน

ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 การหาประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Enhancement efficiency)

การหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใส่ลวดขด ไบบิต และลวดขดร่วมกับไบบิต ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใส่อุปกรณ์ดังกล่าวช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน แต่ขณะเดียวกันค่าความเสียดทานก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่าความเสียดทานที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้แต่สามารถที่จะทำให้น้อยลงได้ โดยขึ้นอยู่กับวิธีและเทคนิคในการออกแบบ ซึ่งในการทดสอบจะใช้วิธีการปรับระยะพิททั้งลวดขดและไบบิต ดังนั้นเราจึงต้องทำการหาว่าอุปกรณ์ช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด โดยมีการพิจารณาค่าความเสียดทานเป็นส่วนประกอบด้วย ซึ่งนั่นก็คือการหาประสิทธิภาพนั่นเอง การหาประสิทธิภาพจะทำการเทียบกับการทดสอบแบบท่อผิวเรียบ ก็คือนำค่าการถ่ายเทความร้อนแบบใส่อุปกรณ์ (Nu_a) หารด้วยค่าการถ่ายเทความร้อนแบบท่อผิวเรียบ (Nu_o) โดยคิดที่ค่ากำลังปั๊มเดียวกัน ซึ่งจะมีขั้นตอนการหาสมการประสิทธิภาพได้ดังนี้

พิจารณาที่ค่ากำลังปั๊มเดียวกัน (Equal pumping power)

$$(\dot{V}\Delta P)_o = (\dot{V}\Delta P)_a$$

และความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับตัวเลขเรย์โนลด์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (f Re^3)_o &= Re_a (f_a / f_o)^{1/3} \\ Re_o &= Re_a (f_a / f_o)^{1/3} \end{aligned}$$

ค่า *enhancement efficiency*, η คืออัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_a) ที่ผิวต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อผิวเรียบ (h_o) ที่กำลังปั๊มคงที่

$$\eta = \frac{h_a}{h_o} \Big|_{pp} = \frac{Nu_a}{Nu_o} \Big|_{pp} = \left(\frac{Nu_a}{Nu_o} \right) \left(\frac{f_a}{f_o} \right)^{-1/3}$$

5.7.1 กรณีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการใส่ลวดขด

สามารถหาสหพันธ์ได้ดังนี้

$$\eta = 0.5 Re^{0.0023} CR^{0.24}$$

5.7.2 กรณีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการใส่ไบบิต

สามารถหาสหพันธ์ได้ดังนี้

$$\eta = 1.1 Re^{-0.021} y^{-0.0054}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7.3 กรณีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการไหลวดขดร่วมกับไบบิต
สามารถหาสหพันธ์ได้ดังนี้

$$\eta = 1.156 \text{Re}^{-0.0454} \text{CR}^{0.021} y^{-0.0173}$$

5.8 ตารางสรุปผลจากการทดลองชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบ

ตารางที่ 5.1 สรุปผลของการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และ enhancement efficiency

ลวดขด (CR)	ไบบิต (y)	\overline{Nu}	\bar{f}	η
CR = 4	-	57.32	0.56	0.72
CR = 6	-	59.24	0.44	0.79
CR = 8	-	58.74	0.36	0.85
CR = 10	-	56.59	0.29	0.89
-	y = 3	44.23	0.12	0.91
-	y = 4	43.09	0.10	0.92
-	y = 5	40.50	0.09	0.92
CR = 4	Y = 3	87.57	1.44	0.77
CR = 6	Y = 3	79.16	0.99	0.78
CR = 8	Y = 3	73.98	0.81	0.78
CR = 10	Y = 3	69.04	0.66	0.79
CR = 4	Y = 4	85.67	1.28	0.77
CR = 6	Y = 4	77.76	0.91	0.77
CR = 8	Y = 4	73.56	0.75	0.78
CR = 10	Y = 4	67.22	0.63	0.78
CR = 4	Y = 5	80.14	1.17	0.76
CR = 6	Y = 5	73.23	0.83	0.77
CR = 8	Y = 5	69.4	0.68	0.78
CR = 10	Y = 5	65.21	0.57	0.78
Smooth tube	-	33.59	0.03	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เทคนิคแบบ passive กล่าวคือการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการออกแบบชิ้นงาน 3 แบบคือ ลวดขด (coiled-wire) ไบบิด (twisted-tape) และลวดขดร่วมกับไบบิด (coils and tapes) ส่วนที่จะทำการศึกษาเป็นกรณีการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการใส่ลวดขดร่วมกับไบบิดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน แล้วเปรียบเทียบกับชิ้นงานแบบลวดขดและไบบิด ที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชิ้นงานแบบลวดขด (coiled-wire) โดยการใส่ชิ้นงานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบประมาณ 180% มีผลเนื่องจากชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดจะเป็นตัวก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนขนาดเล็กๆบริเวณด้านหลังลวดขดตลอดความยาวท่อ ทำให้ชั้นขอบเขตบริเวณผิวร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนถูกทำลายส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็ส่งผลกระทบต่อให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงตาม เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวไปขวางกระแสน้ำไหลบริเวณผิวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอิทธิพลก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนบริเวณผิวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

การศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชิ้นงานแบบไบบิด (twisted-tape) โดยการใส่ชิ้นงานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบประมาณ 140% ผลจากอากาศได้ไหลตามแนวการบิดของไบบิดซึ่งก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนตามแนวการบิดตลอดความยาวท่อ โดยการหมุนวนของอากาศจะมีหน้าที่ผสมอากาศร้อนที่ผิวกับอากาศเย็นบริเวณกึ่งกลางท่อ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น แต่ผลกระทบจากการไหลแบบหมุนวนจะไปทำลายเส้นการไหลทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงตาม

การศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชิ้นงานแบบลวดขดร่วมกับไบบิด (coils and tapes) โดยการใส่ชิ้นงานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจากท่อผิวเรียบประมาณ 270% ผลเนื่องจากการนำชิ้นงานแบบลวดขดที่สร้างความปั่นป่วนบริเวณผิวร้อนรวมเข้ากับไบบิดที่สามารถสร้างอากาศหมุนวนบริเวณกึ่งกลางส่งผลให้กระแสน้ำไหลมีความรุนแรงมากขึ้นกว่าเดิม แต่เนื่องจากการนำลวดขดร่วมกับกับไบบิดก็ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาชิ้นงานทดสอบทั้ง 3 แบบในแง่ของประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้ามุ่งถึงในด้านการลดขนาดวัสดุที่ใช้ในการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สารที่ใช้ในการหล่อเย็น หรือการให้พลังงานในการผลิตความร้อนแก่เครื่องกำเนิดความร้อน การใช้เทคนิคแบบใส่ชิ้นงานแบบลวดขดร่วมกับไบบิตเป็นแนวทางหนึ่งที่จะนำมาพัฒนาต่อเพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เนื่องจากชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดร่วมกับไบบิตสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงมาก

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ลวดขดร่วมกับไบบิตในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกลมเป็นเทคนิคหนึ่งเท่านั้นที่ช่วยในการปรับปรุงสมรรถนะ แต่เทคนิคแบบนี้เป็นเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจเนื่องจากว่าสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงมาก แต่จะต้องทำการปรับปรุงชิ้นงานทดสอบแบบลวดขด และไม่ต้องปรับเปลี่ยนไบบิตเนื่องจากไบบิตมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับลวดขด ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดโดยกำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลางเส้นลวดมีขนาดเล็กลด หรือออกแบบให้มีการเว้นค่า PR ของลวดขดโดยกำหนดให้ไบบิตยาวตลอดตามรูป 6.1 เพื่อจะสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้น

2. การใช้อุปกรณ์ในการวัด ควรใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานหรือมีความละเอียดที่ค่อนข้างสูง เพื่อที่เวลานำมาวิเคราะห์ผลจะได้ผลออกมามีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เปลี่ยนจากสายเทอร์โมคัลเปิลชนิด K เป็นชนิด RTD PT100 เพื่อให้วัดค่าได้ละเอียดขึ้น



รูปที่ 6.1 ชิ้นงานทดสอบแบบลวดขดที่เว้นค่า PR

บรรณานุกรม

- [1] Shyy Woei Chang *, Tsun Lirng Yang, Jin Shuen Liou, "Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert", *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2007) 489–501
- [2] Pongjet Promvonge, "Thermal enhancement in a round tube with snail entry and coiled-wire inserts", *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 623–629
- [3] P. Sivashanmugam *, P.K. Nagarajan, "Studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with right and left helical screw-tape inserts", *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2007) 192–197
- [4] Yildiz, Bicer and Pehlivan, "Effect of twisted strips on heat transfer and pressure drop in heat exchangers", *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Issues 3-4, February-March 1998, Pages 331-336
- [5] Yakut and Sahin, "The effects of vortex characteristics on performance of coiled wire turbulators used for heat transfer augmentation", *Applied Thermal Engineering*, Volume 24, Issue 16, November 2004, Pages 2427-2438
- [6] Smith-ard and Promvonge, "Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators" *Solar Energy*, Volume 78, Issue 4, April 2005, Pages 483-494
- [7] Promvonge and Eiamsa-ard, "Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator", *Energy Conversion and Management*, Volume 47, Issues 18-19, November 2006, Pages 2867-2882
- [8] Promvonge and Eiamsa-ard, "Heat transfer behaviors in a tube with combined conical ring and twisted-tape insert", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 34, Issue 7, August 2007, Pages 849-859
- [9] พงษ์เจต พรหมวงศ์ (2542). "การถ่ายเทความร้อน", *ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [10] ศิริ ดวงพร (2547), "วิธีวิจัยวิทยาศาสตร์", *คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, http://www.aluminiumlearning.com/html/index_properties.html.
- [11] แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา (2544). "วัสดุวิศวกรรม", *สำนักพิมพ์ แมคกรอฮิดอินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์*, หน้า 216 และ 238

- [12] ณีรัฐฉิม ฉมจอหอย, สุริเยนทร์ อุดมจิตร และ อนุวัตร วังหนองลาด (2542), "อลูมิเนียม", ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, http://www.aluminiumlearning.com/html/index_properties.html.
- [13] สุรินทร์ ศรีฉนิตย์ (2545). "การถ่ายเทความร้อน", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [14] มนตรี พิรุณเกษตร (2547). "กลศาสตร์ของไหล", พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์วิทย์พัฒน์ จำกัด.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกของอากาศที่ความดันบรรยากาศ [9]

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^7$ (m ² /s)	$k \cdot 10^7$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.3	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.43	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.90	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.20	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.90	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449	141.80	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473	162.90	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496	185.10	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติต่างๆ ของโลหะ [11]

โลหะ	ค่าการนำความร้อน k (W/m·K)							คุณสมบัติที่ 293 K หรือ 20°C				จุดหลอม เหลว (K)
	200 K -73°C	273 K 0°C	400 K 127°C	600 K 327°C	800 K 527°C	1,000 K 727°C	1,200 K 927°C	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	
อะลูมิเนียม	237	236	240	232	220			2,702	896	236	97.5	933
แอนทิโมนี	30.2	25.5	21.2	18.2	16.8			6,684	208	24.6	17.7	904
เบริลเลียม	301	218	161	126	107	89	73	1,850	1,750	205	63.3	1,550
บิสมีท ^c	9.7	8.2						9,780	124	7.9	6.51	545
โบรอน ^c	52.5	31.7	18.7	11.3	8.1	6.3	5.2	2,500	1,047	28.6	10.9	2,573
แคดเมียม ^c	99.3	97.5	94.7					8,650	231	97	48.5	594
ซีเซียม	36.8	36.1						1,873	230	36	83.6	302
โคบอลต์	111	94.8	87.3	80.5	71.3	65.3	62.4	7,160	440	91.4	29.0	2,118
โคบอลต์ ^c	122	104	84.8					8,862	389	100	29.0	1,765
ทองแดง	413	401	392	383	371	357	342	8,933	383	399	116.6	1,356
เจอร์เมเนียม	96.8	66.7	43.2	27.3	19.8	17.4	17.4	5,360		61.6		1,211
ทองคำ	327	318	312	304	292	278	262	19,300	129	316	126.9	1,336
แฮฟเนียม	24.4	23.3	22.3	21.3	20.8	20.7	20.9	13,280		23.1		2,495
อินเดียม	89.7	83.7	74.5					7,300		82.2		430
อิริเดียม	153	148	144	138	132	126	120	22,500	134	147	48.8	2,716
เหล็ก	94	83.5	69.4	54.7	43.3	32.6	28.2	7,870	452	81.1	22.8	1,810
ตะกั่ว	36.6	35.5	33.8	31.2				11,340	129	35.3	24.1	601
ลิเทียม	88.1	79.2	72.1					534	3,391	77.4	42.7	454
แมกนีเซียม	159	157	153	149	146			1,740	1,017	156	88.2	923
แมงกานีส	7.17	7.68						7,290	486	7.78	2.2	1,517
ปรอท ^c	28.9							13,546				234
โมลิบดีนัม	143	139	134	126	118	112	105	10,240	251	136	53.7	2,883
นิกเกิล	106	94	80.1	65.5	67.4	71.8	76.1	8,900	446	91	22.9	1,726
ไนโอเบียม	52.6	53.3	55.2	58.2	61.3	64.4	67.5	8,570	270	53.6	23.2	2,741
แพลเลเดียม	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	75.5	12,020	247	75.5	25.4	1,825
แพลตินัม	72.4	71.5	71.6	73.0	75.5	78.6	82.6	21,450	133	71.4	25.0	2,042
โพแทสเซียม	104	104	52					860	741	103	161.6	337
รีเนียม	51	48.6	46.1	44.2	44.1	44.6	45.7	21,100	137	48.1	16.6	3,453
โรเดียม	154	151	146	136	127	121	115	12,450	248	150	48.6	2,233
รูบิเดียม	58.9	58.3						1,530	348	58.2	109.3	312
ซิลิคอน	264	168	98.9	61.9	42.2	31.2	25.7	2,330	703	153	93.4	1,685
เงิน	403	428	420	405	389	374	358	10,500	234	427	173.8	1,234
โซเดียม	138	135						971	1,206	133	113.6	371
แทนทาลัม	57.5	57.4	57.8	58.6	59.4	60.2	61	16,600	138	57.5	25.1	3,269
ดีบุก ^c	73.3	68.2	62.2					5,750	227	67.0	51.3	505
ไทเทเนียม ^c	24.5	22.4	20.4	19.4	19.7	20.7	22	4,500	611	22.0	8.0	1,953
ทังสเตน ^c	197	182	162	139	128	121	115	19,300	134	179	69.2	3,653
ยูเรเนียม	25.1	27	29.6	34	38.8	43.9	49	19,070	113	27.4	12.7	1,407
วานาเดียม	31.5	31.3	32.1	34.2	36.3	38.6	41.2	6,100	502	31.4	10.3	2,192
สังกะสี	123	122	116	105				7,140	385	121	44.0	691
เซอร์โคเนียม ^c	25.2	23.2	21.6	20.6	21.6	23.7	25.7	6,571	272	22.8	12.8	2,125

a ความบริสุทธิ์ของทุกสสารเกิน 99%

b ค่าการนำความร้อนจะคลาดเคลื่อนจากค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิของห้องประมาณ $\pm 5\%$ และคลาดเคลื่อนจากค่าที่อุณหภูมิอื่นประมาณ $\pm 10\%$

c ค่าที่อยู่ในตารางของวัสดุที่เป็นผลึก เป็นค่าของวัสดุที่เป็นผลึกทั่ว ๆ ไป (polycrystalline material)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ตารางสัมประสิทธิ์การสูญเสียและการคำนวณหาขนาด
ของโบล์เวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

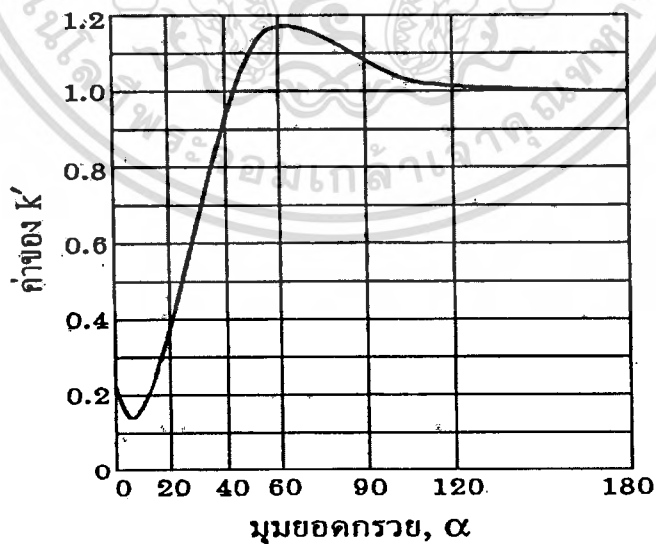
ตารางที่ ข.1 ค่า K สำหรับการไหลผ่านท่อที่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดอย่างค่อยเป็นค่อยไป [14]

อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด A_2/A_1	มุมถ่างของข้อต่อรูปกรวย (θ)						
	10	15-20	50-60	90	120	150	180
0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

ตารางที่ ข.2 ค่า K สำหรับการไหลผ่านท่ออ [14]

อุปกรณ์ในระบบท่อ	K
ข้ออ (elbow)	
ข้ออ 90° (ปกติ), แบบหน้าแปลน	0.3
ข้ออ 90° (ปกติ), แบบเกลียว	1.5
ข้ออ 90° (รัศมียาว), แบบหน้าแปลน	0.2
ข้ออ 90° (ปกติ), แบบเกลียว	0.7
ข้ออ 45° (รัศมียาว), แบบหน้าแปลน	0.2
ข้ออ 45° (ปกติ), แบบเกลียว	0.4

ตารางที่ ข.3 ค่า K สำหรับการไหลผ่านท่อที่มีการเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบค่อยๆ ขยาย [14]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $Re > 4000$ ดังนั้นการไหลนี้เป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) จึงหาค่า f ได้จากสมการ Petukhov จะได้

$$f = 0.026$$

แทนค่าลงในสมการ

$$h_f = \frac{0.026 \times 4 \text{ m} \times 6.15^2 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2 \times 0.0508 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$\therefore h_f = 3.9465 \text{ m}$$

การหาค่าสูญเสียตรง (h_m) จากสมการ (3.12) คือ

$$h_m = K \frac{V^2}{2g}$$

ตารางที่ ข.4 ค่า K ของอุปกรณ์ที่ขนาดท่อต่างๆ

ชุดข้อต่อ	ค่า K
1. ท่อลดขนาด 50° - 60° 6 นิ้ว - 4 นิ้ว	0.0622
2. ท่อลดขนาด 50° - 60° 4 นิ้ว - 2 นิ้ว กับ 2 นิ้ว - 1 นิ้ว	0.07
3. ช็องอ 90° 2 ตัว ($K=0.3$)	0.6
4. ท่อเพิ่มขนาด 50° - 60° 1 นิ้ว - 2 นิ้ว	1.18
5. Ball Valve 1 ตัว	0.05

ที่ท่อลดขนาด 4 นิ้ว - 2 นิ้ว

แทนค่าลงในสมการ

$$h_m = \frac{0.07 \times 6.15^2 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$\therefore h_m = 1.274 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 สรุปค่าการสูญเสีย (h_{loss})

Diameter	K	f	Re	V (m/s)	h_f (m)	h_m (m)
1. ท่อตรง 6 นิ้วยาว 1.15 m	-	0.036	6532	0.6758	0.0063	-
2. ท่อลดขนาด 50° - 60° 6 นิ้ว – 4 นิ้ว	0.0622	-		1.5185	-	0.0073
3. ท่อตรง 2 นิ้วยาว 4 m ท่อลดขนาด 50° - 60° 4 นิ้ว – 2 นิ้ว	0.07	0.026	20250	6.15	3.9465	0.1349
4. ท่อตรง 1 นิ้วยาว 2.68 m ท่อลดขนาด 50° - 60° 2 นิ้ว – 1 นิ้ว	0.07	0.022	39628	24.6	71.5970	2.1590
5. ข้องอ 90° 2 ตัว	0.6	-		24.6	-	18.5064
6. ท่อเพิ่มขนาด 50° - 60° 1 นิ้ว – 2 นิ้ว ($h_m = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$)	1.18	-		24.6(V_1) 6.15(V_2)	-	20.4727
7. Ball Valve 1 ตัว	0.05	-		24.6	-	1.5422
1.2.1 ผลรวมการสูญเสีย (h_{loss})					75.5498	42.8225

หาขนาดของปั๊ม โดยแทนค่า $V_1 = 0.6758$ m/s, $V_2 = 6.15$ m/s

$z_1 = 0$ m, $z_2 = 1.33$ m และ $h_{loss} = 118.3723$ m

ลงในสมการ (3.13) จะได้

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 1361.9 \text{ Pa}$$

แทนค่า ΔP และ $Q = 0.0123$ m³/s ลงในสมการ (3.14) จะได้

$$\begin{aligned} \text{Power} &= 16.7512 \text{ W} \times \frac{1 \text{ Hp}}{745.7 \text{ W}} \\ &= 0.0225 \text{ Hp} \end{aligned}$$

การนำไปใช้ต้องเผื่อไว้ประมาณ 2-3 เท่า แต่ในการทดสอบนี้จะใช้โบลว์เวอร์ขนาด 10 Hp

เพราะได้รับความเอื้ออำนวยจากสถาบันการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

คุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน Type ต่างๆ [10]

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		C	F	
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม			
	แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม - 13% โรเดียม			
	แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม-10% โรเดียม			
	แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-350 ถึง 1400	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมิล/อะลูเมิล	-270 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตน แตน	-270 ถึง 400	- 450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.865
E	โครเมิล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	- 450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358
- แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างสมการด้วยรีเกรสชันเส้นตรงแบบหลายตัวแปร(Multiple Linear Regression)

โดยทั่วไป ตัวแปรตามแต่ละตัวหรือค่าตอบสนอง (Response ; y) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ n (Independent หรือ Regressor variables) เช่น x_1, x_2, \dots, x_n เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ สามารถอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [9] ที่เรียกว่า “สมการรีเกรสชัน” (สมการถดถอย ; Regression equation) แบบจำลองรีเกรสชันจะสอดคล้องกับกลุ่มของข้อมูลของตัวอย่างบางกรณีผู้ทดสอบทราบถึงฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร เช่น $y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่จะไม่ทราบฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปร ดังนั้นจึงต้องมีการประมาณค่าของฟังก์ชันเพื่อประมาณค่า ϕ โดยในการทดสอบนี้จะใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel มาช่วยในการหาฟังก์ชัน

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน ค่า Nu มักมีตัวแปรอิสระที่สนใจศึกษามากกว่า 1 ตัวแปร เช่น Re, Pr และพารามิเตอร์อื่นๆ เป็นต้น แบบจำลองทั่วไปที่ใช้จะอยู่ในรูปแบบของ Multiple Exponential Regression Model คือ

$$y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} x_3^{b_3} \dots x_n^{b_n} \quad (3.28)$$

ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูป Multiple Linear Regress in Logarithmic Scale คือ

$$\ln(y) = \ln b_0 + b_1 \ln(x_1) + b_2 \ln(x_2) + b_3 \ln(x_3) \dots + b_n \ln(x_n) \quad (3.29)$$

เมื่อ b_0 = ค่าคงที่
 b_i = ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของเส้นตรงของตัวแปร x_i

จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์การถดถอย

1. เพื่อสร้างสมการถดถอยซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร เพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรตัวหนึ่งเรียกว่า ตัวแปรตาม จากการกำหนดค่าตัวแปรอีกตัวหนึ่งหรือหลายตัว ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรอิสระ
2. เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้สมการถดถอยพยากรณ์ค่าตัวแปรที่สนใจ
3. เพื่อวัดสัดส่วนของความแปรปรวนในตัวแปรตามว่าเนื่องมาจากตัวแปรอิสระมีค่า เป็นเท่าไร เมื่อเทียบกับความแปรปรวนทั้งหมด
4. เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเบียบวิธีการสร้างสหสัมพันธ์จากโปรแกรม Microsoft Excel

1. เปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในรูปของ \log_{10}

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Re	Nu	Pr,0.4	Nu/Pr,0.4	CR	y	ln Nu/Pr,0.4	ln Re	ln CR	ln y			
1	3759	40	0.8670	46.6203	4	3	3.8420	9.4327	1.3863	1.0986			CR=4;y=3
3	6621	61	0.8670	70.6072	4	3	4.2571	9.6361	1.3863	1.0986			
4	9572	81	0.8670	93.3758	4	3	4.5366	9.8003	1.3863	1.0986			
5	12518	98	0.8670	113.4602	4	3	4.7315	8.2262	1.3863	1.0986			
6	15367	115	0.8670	132.5649	4	3	4.8871	8.7888	1.3863	1.0986			
7	18163	129	0.8670	149.3301	4	3	5.0062	9.1604	1.3863	1.0986			
8	3680	36	0.8670	41.4783	6	3	3.7252	8.2106	1.7918	1.0986			CR=6;y=3
9	6627	55	0.8670	63.6211	6	3	4.1529	8.7837	1.7918	1.0986			
10	9522	73	0.8670	84.4867	6	3	4.4366	9.1614	1.7918	1.0986			
11	12454	90	0.8670	103.4666	6	3	4.6394	9.4298	1.7918	1.0986			
12	15322	104	0.8670	119.5321	6	3	4.7836	9.6370	1.7918	1.0986			
13	18154	117	0.8670	136.1782	6	3	4.9066	9.8067	1.7918	1.0986			
14	3703	34	0.8670	39.2182	8	3	3.6691	8.2168	2.0794	1.0986			CR=8;y=3
15	6606	52	0.8670	59.7116	8	3	4.0895	8.7804	2.0794	1.0986			
16	9489	68	0.8670	78.6054	8	3	4.3644	9.1579	2.0794	1.0986			
17	12447	84	0.8670	96.3887	8	3	4.5684	9.4292	2.0794	1.0986			
18	15292	97	0.8670	111.5608	8	3	4.7146	9.6351	2.0794	1.0986			
19	18117	110	0.8670	126.4689	8	3	4.8400	9.8046	2.0794	1.0986			
20	3703	32	0.8670	36.4346	10	3	3.5955	8.2170	2.3026	1.0986			CR=10;y=3
21	6674	48	0.8670	55.3666	10	3	4.0145	8.7909	2.3026	1.0986			
22	9504	64	0.8670	73.3824	10	3	4.2950	9.1595	2.3026	1.0986			
23	12454	77	0.8670	83.3755	10	3	4.4928	9.4288	2.3026	1.0986			
24	15371	91	0.8670	104.3870	10	3	4.6481	9.6402	2.3026	1.0986			
25	18229	103	0.8670	118.8517	10	3	4.7779	9.8108	2.3026	1.0986			
26	3733	39	0.8670	45.2519	4	4	3.8122	8.2249	1.3863	1.3863			CR=4;y=4
27	6607	60	0.8670	69.7519	4	4	4.2449	8.7960	1.3863	1.3863			
28	9578	79	0.8670	91.5970	4	4	4.5174	9.1672	1.3863	1.3863			
29	12490	97	0.8670	111.6110	4	4	4.7150	9.4327	1.3863	1.3863			
30	15307	112	0.8670	129.0381	4	4	4.8601	9.6361	1.3863	1.3863			
31	18039	126	0.8670	145.6233	4	4	4.9810	9.8003	1.3863	1.3863			
32	3738	36	0.8670	41.3389	6	4	3.7218	8.2262	1.7918	1.3863			CR=6;y=4
33	6660	54	0.8670	62.6052	6	4	4.1368	8.7888	1.7918	1.3863			
34	9513	71	0.8670	82.1858	6	4	4.4090	9.1604	1.7918	1.3863			

2. หลังจากผ่านขั้นตอนที่ 1 แล้วให้เคลื่อนเมาส์ไปที่ไอคอน (เครื่องมือ)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Re	Nu	Pr,0.4	Nu/Pr,0.4	CR	y	ln Nu/Pr,0.4	ln Re	ln CR	ln y			
1	3759	40	0.8670	46.6203	4	3	3.8420	9.4327	1.3863	1.0986			CR=4;y=3
3	6621	61	0.8670	70.6072	4	3	4.2571	9.6361	1.3863	1.0986			
4	9572	81	0.8670	93.3758	4	3	4.5366	9.8003	1.3863	1.0986			
5	12518	98	0.8670	113.4602	4	3	4.7315	8.2262	1.3863	1.0986			
6	15367	115	0.8670	132.5649	4	3	4.8871	8.7888	1.3863	1.0986			
7	18163	129	0.8670	149.3301	4	3	5.0062	9.1604	1.3863	1.0986			
8	3680	36	0.8670	41.4783	6	3	3.7252	8.2106	1.7918	1.0986			CR=6;y=3
9	6627	55	0.8670	63.6211	6	3	4.1529	8.7837	1.7918	1.0986			
10	9522	73	0.8670	84.4867	6	3	4.4366	9.1614	1.7918	1.0986			
11	12454	90	0.8670	103.4666	6	3	4.6394	9.4298	1.7918	1.0986			
12	15322	104	0.8670	119.5321	6	3	4.7836	9.6370	1.7918	1.0986			
13	18154	117	0.8670	136.1782	6	3	4.9066	9.8067	1.7918	1.0986			
14	3703	34	0.8670	39.2182	8	3	3.6691	8.2168	2.0794	1.0986			CR=8;y=3
15	6606	52	0.8670	59.7116	8	3	4.0895	8.7804	2.0794	1.0986			
16	9489	68	0.8670	78.6054	8	3	4.3644	9.1579	2.0794	1.0986			
17	12447	84	0.8670	96.3887	8	3	4.5684	9.4292	2.0794	1.0986			
18	15292	97	0.8670	111.5608	8	3	4.7146	9.6351	2.0794	1.0986			
19	18117	110	0.8670	126.4689	8	3	4.8400	9.8046	2.0794	1.0986			
20	3703	32	0.8670	36.4346	10	3	3.5955	8.2170	2.3026	1.0986			CR=10;y=3
21	6674	48	0.8670	55.3666	10	3	4.0145	8.7909	2.3026	1.0986			
22	9504	64	0.8670	73.3824	10	3	4.2950	9.1595	2.3026	1.0986			
23	12454	77	0.8670	83.3755	10	3	4.4928	9.4288	2.3026	1.0986			
24	15371	91	0.8670	104.3870	10	3	4.6481	9.6402	2.3026	1.0986			
25	18229	103	0.8670	118.8517	10	3	4.7779	9.8108	2.3026	1.0986			
26	3733	39	0.8670	45.2519	4	4	3.8122	8.2249	1.3863	1.3863			CR=4;y=4
27	6607	60	0.8670	69.7519	4	4	4.2449	8.7960	1.3863	1.3863			
28	9578	79	0.8670	91.5970	4	4	4.5174	9.1672	1.3863	1.3863			
29	12490	97	0.8670	111.6110	4	4	4.7150	9.4327	1.3863	1.3863			
30	15307	112	0.8670	129.0381	4	4	4.8601	9.6361	1.3863	1.3863			
31	18039	126	0.8670	145.6233	4	4	4.9810	9.8003	1.3863	1.3863			
32	3738	36	0.8670	41.3389	6	4	3.7218	8.2262	1.7918	1.3863			CR=6;y=4
33	6660	54	0.8670	62.6052	6	4	4.1368	8.7888	1.7918	1.3863			
34	9513	71	0.8670	82.1858	6	4	4.4090	9.1604	1.7918	1.3863			

เอกสารนี้เป็น

ลิขสิทธิ์ของสถาบัน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกไอคอน (Data Analysis) และ Regression

Microsoft Excel - coil and Tap,CR,Y,t=1(1),2,d=5,L=1.5,(Ts,Tb),NEW

เมนู แฟ้ม วิสัย ข้อมูล สูตร การคำนวณ ชื่อสูตร หน้าต่าง 3618

100%

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Re	Nu	Pr0.4	Nu/Pr0.4	CR	y	ln Nu/Pr0.4	ln Re	ln CR	ln y			
1													CR=4:y=3
2	3759	40	0.8670	46.6203	4	3	3.8420	9.4327	1.3863	1.0986			
3	6621	61	0.8670	70.6072	4	3	4.2571	9.6361	1.3863	1.0986			
4	9572	81	0.8670	93.3758	4	3	4.5366	9.8003	1.3863	1.0986			
5	12518	98	0.8670	113.4602	4	3	4.7315	8.2262	1.3863	1.0986			
6	15367	115	0.8670	132.5649	4	3							
7	18163	129	0.8670	149.3301	4	3							
8	3680	36	0.8670	41.4783	4	4							CR=6:y=3
9	6527	55	0.8670	63.6211	4	4							
10	9522	73	0.8670	84.4867	4	4							
11	12454	90	0.8670	103.4866	4	4							
12	15322	104	0.8670	119.5321	4	4							
13	18154	117	0.8670	136.1782	4	4							
14	3703	34	0.8670	39.2182	4	3							CR=8:y=3
15	6506	52	0.8670	59.7116	4	3							
16	9489	68	0.8670	78.6054	4	3	4.5684	9.4292	2.0794	1.0986			
17	12447	84	0.8670	96.3887	4	3	4.7146	9.6351	2.0794	1.0986			
18	15292	97	0.8670	111.5608	4	3	4.8400	9.8046	2.0794	1.0986			
19	18117	110	0.8670	126.4689	4	3	4.9555	8.2170	2.3026	1.0986			
20	3703	32	0.8670	36.4346	4	3	4.0145	9.7909	2.3026	1.0986			CR=10:y=3
21	6574	48	0.8670	56.3566	4	3	4.2960	9.1635	2.3026	1.0986			
22	9504	64	0.8670	73.3324	4	3	4.4928	9.4298	2.3026	1.0986			
23	12454	77	0.8670	89.3755	4	3	4.6481	9.6402	2.3026	1.0986			
24	15371	91	0.8670	104.3870	4	3	4.7778	9.8108	2.3026	1.0986			
25	18229	103	0.8670	118.8517	4	3							
26	3733	39	0.8670	45.2519	4	4	3.8122	8.2249	1.3863	1.3863			CR=4:y=4
27	6607	60	0.8670	69.7519	4	4	4.2449	8.7960	1.3863	1.3863			
28	9578	79	0.8670	91.5970	4	4	4.5174	9.1672	1.3863	1.3863			
29	12490	97	0.8670	111.6110	4	4	4.7150	9.4327	1.3863	1.3863			
30	15307	112	0.8670	129.0381	4	4	4.8601	9.6361	1.3863	1.3863			
31	18039	126	0.8670	145.6233	4	4	4.9810	9.8003	1.3863	1.3863			
32	3738	36	0.8670	41.3389	6	4	3.7218	8.2262	1.7918	1.3863			CR=6:y=4
33	6560	54	0.8670	62.6052	6	4	4.1368	8.7888	1.7918	1.3863			
34	9513	71	0.8670	82.1868	6	4	4.4090	9.1604	1.7918	1.3863			

Data Analysis

Analysis Tools

- Histogram
- Moving Average
- Random Number Generation
- Rank and Percentile
- Regression
- Sampling
- t-Test: Paired Two Sample for Means
- t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances
- t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances
- z-Test: Two Sample for Means

Microsoft Excel - coil and Tap,CR,Y,t=1(1),2,d=5,L=1.5,(Ts,Tb),NEW

เมนู แฟ้ม วิสัย ข้อมูล สูตร การคำนวณ ชื่อสูตร หน้าต่าง 3618

100%

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Re	Nu	Pr0.4	Nu/Pr0.4	CR	y	ln Nu/Pr0.4	ln Re	ln CR	ln y			
1													CR=4:y=3
2	3759	40	0.8670	46.6203	4	3	3.8420	9.4327	1.3863	1.0986			
3	6621	61	0.8670	70.6072	4	3	4.2571	9.6361	1.3863	1.0986			
4	9572	81	0.8670	93.3758	4	3	4.5366	9.8003	1.3863	1.0986			
5	12518	98	0.8670	113.4602	4	3	4.7315	8.2262	1.3863	1.0986			
6	15367	115	0.8670	132.5649	4	3							
7	18163	129	0.8670	149.3301	4	3							
8	3680	36	0.8670	41.4783	4	4							CR=6:y=3
9	6527	55	0.8670	63.6211	4	4							
10	9522	73	0.8670	84.4867	4	4							
11	12454	90	0.8670	103.4866	4	4							
12	15322	104	0.8670	119.5321	4	4							
13	18154	117	0.8670	136.1782	4	4							
14	3703	34	0.8670	39.2182	4	3							CR=8:y=3
15	6506	52	0.8670	59.7116	4	3							
16	9489	68	0.8670	78.6054	4	3							
17	12447	84	0.8670	96.3887	4	3							
18	15292	97	0.8670	111.5608	4	3							
19	18117	110	0.8670	126.4689	4	3							
20	3703	32	0.8670	36.4346	4	3							CR=10:y=3
21	6574	48	0.8670	56.3566	4	3							
22	9504	64	0.8670	73.3324	4	3							
23	12454	77	0.8670	89.3755	4	3							
24	15371	91	0.8670	104.3870	4	3							
25	18229	103	0.8670	118.8517	4	3							
26	3733	39	0.8670	45.2519	4	4							CR=4:y=4
27	6607	60	0.8670	69.7519	4	4							
28	9578	79	0.8670	91.5970	4	4	4.5174	9.1672	1.3863	1.3863			
29	12490	97	0.8670	111.6110	4	4	4.7150	9.4327	1.3863	1.3863			
30	15307	112	0.8670	129.0381	4	4	4.8601	9.6361	1.3863	1.3863			
31	18039	126	0.8670	145.6233	4	4	4.9810	9.8003	1.3863	1.3863			
32	3738	36	0.8670	41.3389	6	4	3.7218	8.2262	1.7918	1.3863			CR=6:y=4
33	6560	54	0.8670	62.6052	6	4	4.1368	8.7888	1.7918	1.3863			
34	9513	71	0.8670	82.1868	6	4	4.4090	9.1604	1.7918	1.3863			

Regression

Input

Input Y Range: []

Input X Range: []

Labels Constant is Zero

Confidence Level: 5% %

Output options

Output Range: []

New Worksheet Ply: []

New Workbook

Residuals

Residuals Residual Plots

Standardized Residuals Line Fit Plots

Normal Probability

Normal Probability Plots

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เลือกช่อง Input Y Range แล้วทำการเลือกข้อมูลทุกค่าที่ใช้ในแกน y เสร็จแล้ว ให้เลือกช่อง Input X Range แล้วทำการเลือกข้อมูลทุกค่าที่ใช้ในแกน x

Microsoft Excel - coil and Tape,CR-Y,t=1(1),Z,d=5I=1.5,(Ts-Tb).NEW

H2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Re	Nu	Pr.4	NuPr.4	CR	y		ln NuPr.4	ln Re	ln CR	ln y		CR=4y=3
2	3759	40	0.8670	46.6203	4	3		3.8420	9.4327	1.3863	1.0986		
3	6621	61	0.8670	70.6072	4	3		4.2571	9.6361	1.3863	1.0986		
4	9672	81	0.8670	93.3758	4	3		4.5366	9.8003	1.3863	1.0986		
5	12518	98	0.8670	113.4602	4	3		4.7315	8.2262	1.3863	1.0986		
6	15367	115	0.8670	132.5649	4	3		4.8871	8.7888	1.3863	1.0986		
7	18163	129	0.8670	149.3301	4	3		5.0062	9.1604	1.3863	1.0986		
8	3680	36	0.8670	41.4783	6	3		3.7252	8.2106	1.7918	1.0986		CR=6y=3
9	6627	55	0.8670	63.6211	6	3		4.1529	8.7837	1.7918	1.0986		
10	9622	73	0.8670	84.4867	6	3		4.4366	9.1614	1.7918	1.0986		
11	12454	90	0.8670	103.4866	6	3		4.6394	9.4298	1.7918	1.0986		
12	15322	104	0.8670	119.5321	6	3		4.7836	9.6370	1.7918	1.0986		
13	18154	117	0.8670	135.1792	6	3		4.9066	9.8067	1.7918	1.0986		
14	3703	34	0.8670	39.2182	8	3		3.6691	8.2168	2.0794	1.0986		CR=8y=3
15	6506	52	0.8670	59.7116	8	3		4.0095	8.7804	2.0794	1.0986		
16	9489	68	0.8670	78.6054	8	3		4.3644	9.1579	2.0794	1.0986		
17	12447	84	0.8670	96.38	8	3		4.6491	9.4108	2.0794	1.0986		
18	15292	97	0.8670	111.56	8	3		4.7779	9.6108	2.0794	1.0986		
19	18117	110	0.8670	126.48	8	3		4.8601	9.8003	2.0794	1.0986		
20	3703	32	0.8670	36.4346	10	3		3.5955	8.2170	2.3026	1.0986		CR=10y=3
21	6574	48	0.8670	55.3966	10	3		4.0145	8.7909	2.3026	1.0986		
22	9504	64	0.8670	73.3324	10	3		4.2950	9.1595	2.3026	1.0986		
23	12454	77	0.8670	89.3755	10	3		4.4926	9.4298	2.3026	1.0986		
24	15371	91	0.8670	104.3970	10	3		4.6481	9.6402	2.3026	1.0986		
25	18229	103	0.8670	118.8517	10	3		4.7779	9.8108	2.3026	1.0986		
26	3733	39	0.8670	45.2519	4	4		3.8122	8.2249	1.3863	1.3863		CR=4y=4
27	6607	60	0.8670	69.7519	4	4		4.2449	8.7960	1.3863	1.3863		
28	9578	79	0.8670	91.5970	4	4		4.5174	9.1672	1.3863	1.3863		
29	12490	97	0.8670	111.6110	4	4		4.7150	9.4327	1.3863	1.3863		
30	15307	112	0.8670	129.0381	4	4		4.8601	9.6361	1.3863	1.3863		
31	18039	126	0.8670	145.6233	4	4		4.9810	9.8003	1.3863	1.3863		
32	3736	36	0.8670	41.3389	6	4		3.7218	8.2262	1.7918	1.3863		CR=6y=4
33	6560	54	0.8670	62.6052	6	4		4.1368	8.7888	1.7918	1.3863		
34	9513	71	0.8670	82.1868	6	4		4.4090	9.1604	1.7918	1.3863		

Microsoft Excel - coil and Tape,CR-Y,t=1(1),Z,d=5I=1.5,(Ts-Tb).NEW

D	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Re	Nu	Pr.4	NuPr.4	CR	y		ln NuPr.4	ln Re	ln CR	ln y		CR=4y=3
2	3759	40	0.8670	46.6203	4	3		3.8420	9.4327	1.3863	1.0986		
3	6621	61	0.8670	70.6072	4	3		4.2571	9.6361	1.3863	1.0986		
4	9672	81	0.8670	93.3758	4	3		4.5366	9.8003	1.3863	1.0986		
5	12518	98	0.8670	113.4602	4	3		4.7315	8.2262	1.3863	1.0986		
6	15367	115	0.8670	132.5649	4	3		4.8871	8.7888	1.3863	1.0986		
7	18163	129	0.8670	149.3301	4	3		5.0062	9.1604	1.3863	1.0986		
8	3680	36	0.8670	41.4783	6	3		3.7252	8.2106	1.7918	1.0986		CR=6y=3
9	6627	55	0.8670	63.6211	6	3		4.1529	8.7837	1.7918	1.0986		
10	9622	73	0.8670	84.4867	6	3		4.4366	9.1614	1.7918	1.0986		
11	12454	90	0.8670	103.4866	6	3		4.6394	9.4298	1.7918	1.0986		
12	15322	104	0.8670	119.5321	6	3		4.7836	9.6370	1.7918	1.0986		
13	18154	117	0.8670	135.1792	6	3		4.9066	9.8067	1.7918	1.0986		
14	3703	34	0.8670	39.2182	8	3		3.6691	8.2168	2.0794	1.0986		CR=8y=3
15	6506	52	0.8670	59.7116	8	3		4.0095	8.7804	2.0794	1.0986		
16	9489	68	0.8670	78.6054	8	3		4.3644	9.1579	2.0794	1.0986		
17	12447	84	0.8670	96.38	8	3		4.6491	9.4108	2.0794	1.0986		
18	15292	97	0.8670	111.56	8	3		4.7779	9.6108	2.0794	1.0986		
19	18117	110	0.8670	126.48	8	3		4.8601	9.8003	2.0794	1.0986		
20	3703	32	0.8670	36.4346	10	3		3.5955	8.2170	2.3026	1.0986		CR=10y=3
21	6574	48	0.8670	55.3966	10	3		4.0145	8.7909	2.3026	1.0986		
22	9504	64	0.8670	73.3324	10	3		4.2950	9.1595	2.3026	1.0986		
23	12454	77	0.8670	89.3755	10	3		4.4926	9.4298	2.3026	1.0986		
24	15371	91	0.8670	104.3970	10	3		4.6481	9.6402	2.3026	1.0986		
25	18229	103	0.8670	118.8517	10	3		4.7779	9.8108	2.3026	1.0986		
26	3733	39	0.8670	45.2519	4	4		3.8122	8.2249	1.3863	1.3863		CR=4y=4
27	6607	60	0.8670	69.7519	4	4		4.2449	8.7960	1.3863	1.3863		
28	9578	79	0.8670	91.5970	4	4		4.5174	9.1672	1.3863	1.3863		
29	12490	97	0.8670	111.6110	4	4		4.7150	9.4327	1.3863	1.3863		
30	15307	112	0.8670	129.0381	4	4		4.8601	9.6361	1.3863	1.3863		
31	18039	126	0.8670	145.6233	4	4		4.9810	9.8003	1.3863	1.3863		
32	3736	36	0.8670	41.3389	6	4		3.7218	8.2262	1.7918	1.3863		CR=6y=4
33	6560	54	0.8670	62.6052	6	4		4.1368	8.7888	1.7918	1.3863		
34	9513	71	0.8670	82.1868	6	4		4.4090	9.1604	1.7918	1.3863		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เสร็จแล้วเลือก O.K จะได้ตารางตามรูปข้างล่าง และเขียนข้อมูลให้อยู่ในรูป Nu และ

Friction fscion

Microsoft Excel - coil and Tape,CR-Y,1-(1).2,d=5,1-1.5,(Ts-Tb)NEW										
M37										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	SUMMARY OUTPUT									
2										
3	Regression Statistics									
4	Multiple R	0.982287461								
5	R Square	0.778431164								
6	Adjusted R Square	0.768656088								
7	Standard Error	0.196540382								
8	Observations	72								
9										
10	ANOVA									
11		df	SS	MS	F	Significance F				
12	Regression	3	9.417121143	3.139040381	79.63412205	3.29305E-22				
13	Residual	68	2.680443262	0.039418283						
14	Total	71	12.0975644							
15										
16			Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
17	Intercept	ln a	-0.961805363	0.448263833	-2.145623385	0.035476308	-1.856301905	-0.067308822	-1.856301905	-0.06731
18	X Variable 1	b	0.652934189	0.043579952	14.98265027	3.1458E-23	0.566972942	0.739895424	0.566972942	0.739895
19	X Variable 2	c	-0.243049331	0.068297128	-3.558705022	0.000684888	-0.379334126	-0.106764537	-0.379334126	-0.10676
20	X Variable 3	d	-0.132824596	0.111901746	-1.186975204	0.23936758	-0.356121054	0.090471857	-0.356121054	0.090472
21										
22	$Nu_x = aRe^bPR^{c-4}CR^d$									
23										



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีท่อผิวเรียบ (smooth tube)

Re	Nu_o	f_o	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3322	13.977	0.0421	-	-	-
5854	20.978	0.0383	-	-	-
8507	27.680	0.0351	-	-	-
11352	34.428	0.0321	-	-	-
14185	40.393	0.0300	-	-	-
16960	46.335	0.0284	-	-	-
19673	51.373	0.0273	-	-	-

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ตัวคด, CR = 4

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3665	25.198	0.6107	1.6874	14.4508	0.6928
5039	33.556	0.5838	1.7779	14.9666	0.7215
6487	41.407	0.5713	1.8221	15.6061	0.7291
7936	48.945	0.5605	1.8570	16.1064	0.7353
9399	55.536	0.5613	1.8608	16.8323	0.7261
10879	61.774	0.5586	1.8588	17.3760	0.7177
12341	67.807	0.5490	1.8596	17.6307	0.7145
13792	73.691	0.5418	1.8624	17.8902	0.7121
15214	79.816	0.5486	1.8768	18.5694	0.7087
16645	85.540	0.5455	1.8827	18.8848	0.7070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขด, CR = 6

Re	Nu_x	f_x	Nu_x/Nu_o	f_x/f_o	enhancement efficiency
3638	25.679	0.4717	1.7289	11.1400	0.7741
5004	34.255	0.4560	1.8244	11.6685	0.8044
6443	42.259	0.4507	1.8689	12.2897	0.8099
7925	49.649	0.4488	1.8857	12.8912	0.8042
9410	57.207	0.4386	1.9151	13.1549	0.8113
10876	63.838	0.4345	1.9213	13.5157	0.8066
12334	70.909	0.4333	1.9455	13.9112	0.8089
13769	77.205	0.4289	1.9537	14.1571	0.8076
15193	82.824	0.4311	1.9495	14.5867	0.7979
16617	88.549	0.4266	1.9514	14.7617	0.7955

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขด, CR = 8

Re	Nu_x	f_x	Nu_x/Nu_o	f_x/f_o	enhancement efficiency
3662	25.936	0.4112	1.7376	9.7282	0.8140
5007	34.955	0.3907	1.8609	9.9996	0.8638
6435	42.978	0.3690	1.9025	10.0596	0.8813
7912	50.433	0.3649	1.9178	10.4795	0.8764
9383	56.967	0.3576	1.9110	10.7172	0.8668
10853	63.306	0.3496	1.9082	10.8681	0.8615
12313	69.169	0.3482	1.9001	11.1741	0.8499
13749	75.474	0.3454	1.9118	11.3958	0.8496
15171	81.571	0.3460	1.9221	11.7022	0.8466
16597	86.654	0.3415	1.9114	11.8139	0.8392

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีไหลววด, $CR = 10$

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3629	25.282	0.3247	1.7052	7.6642	0.8649
4953	33.688	0.3113	1.8077	7.9454	0.9059
6376	41.270	0.2989	1.8392	8.1281	0.9148
7841	48.273	0.2963	1.8479	8.4895	0.9059
9319	54.929	0.2872	1.8519	8.5927	0.9042
10782	61.138	0.2807	1.8518	8.7128	0.8999
12240	67.312	0.2758	1.8572	8.8383	0.8983
13673	72.083	0.2722	1.8334	8.9696	0.8824
15114	78.015	0.2774	1.8434	9.3729	0.8743
16538	83.859	0.2669	1.8545	9.2251	0.8843

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีไหลใบปิด, $y = 3$

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3610	21.183	0.1515	1.434	3.571	0.938
6353	31.758	0.1301	1.419	3.535	0.932
9270	41.443	0.1175	1.403	3.510	0.923
12145	49.796	0.1115	1.382	3.566	0.904
14999	57.290	0.1065	1.361	3.592	0.889
17826	63.936	0.1023	1.338	3.605	0.873

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ใบบิด, $y = 4$

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3622	20.301	0.1303	1.371	3.074	0.943
6320	30.742	0.1142	1.379	3.099	0.946
9202	40.208	0.1058	1.368	3.154	0.933
12170	48.664	0.0968	1.348	3.099	0.925
15013	56.084	0.0935	1.332	3.154	0.908
17826	62.526	0.0877	1.309	3.090	0.898

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ใบบิด, $y = 5$

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3629	18.440	0.1139	1.244	2.688	0.894
6298	28.000	0.0981	1.259	2.659	0.909
9165	37.274	0.0897	1.272	2.673	0.917
12001	45.559	0.0854	1.275	2.724	0.913
14887	53.300	0.0794	1.273	2.672	0.918
17706	60.418	0.0763	1.271	2.683	0.914

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและใบบิด, CR = 4: y = 3

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3759	40.422	1.5039	2.656	35.814	0.806
6621	61.219	1.4720	2.654	40.416	0.773
9572	80.961	1.4342	2.676	43.205	0.763
12518	98.375	1.4282	2.670	46.025	0.745
15367	114.939	1.4144	2.683	47.992	0.738
18163	129.475	1.4031	2.673	49.656	0.727

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและใบบิด, CR = 6: y = 3)

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3680	35.963	1.0545	2.401	24.976	0.821
6527	55.162	1.0166	2.416	27.812	0.798
9522	73.253	0.9928	2.431	29.867	0.784
12454	89.727	0.9710	2.444	31.253	0.776
15322	103.639	0.9674	2.424	32.802	0.757
18154	117.205	0.9550	2.420	33.792	0.749

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและไบบิต, CR = 8: y = 3

Re	Nu _a	f _a	Nu _a /Nu _o	f _a /f _o	enhancement efficiency
3703	34.004	0.8755	2.260	20.769	0.822
6506	51.772	0.8352	2.273	22.830	0.801
9489	68.154	0.8120	2.267	24.408	0.782
12447	83.573	0.7892	2.278	25.398	0.775
15292	96.728	0.7699	2.266	26.093	0.764
18117	109.654	0.7591	2.268	26.846	0.757

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและไบบิต, CR = 10: y = 3

Re	Nu _a	f _a	Nu _a /Nu _o	f _a /f _o	enhancement efficiency
3703	31.590	0.7587	2.099	17.999	0.801
6574	48.031	0.7086	2.093	19.422	0.779
9504	63.582	0.6592	2.113	19.822	0.781
12454	77.492	0.6373	2.111	20.510	0.771
15371	90.508	0.6263	2.112	21.252	0.763
18229	103.049	0.6063	2.122	21.476	0.763

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและไบบิต, CR = 4: y = 4

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3733	39.235	1.3360	2.592	31.758	0.818
6607	60.478	1.2920	2.626	35.457	0.799
9578	79.418	1.2722	2.624	38.330	0.778
12490	96.771	1.2603	2.631	40.592	0.765
15307	111.881	1.2474	2.619	42.285	0.752
18039	126.261	1.2489	2.620	44.120	0.741

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและไบบิต, CR = 6: y = 4

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3738	35.843	0.9867	2.366	23.463	0.826
6560	54.281	0.9325	2.369	25.545	0.804
9513	71.259	0.9123	2.367	27.438	0.785
12451	87.323	0.8923	2.379	28.716	0.777
15330	101.863	0.8902	2.382	30.189	0.765
18106	115.993	0.8695	2.400	30.746	0.766

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและใบบิด, CR = 8: y = 4

Re	Nu _a	f _a	Nu _a /Nu _o	f _a /f _o	enhancement efficiency
3726	33.844	0.8141	2.239	19.344	0.834
6583	51.479	0.7890	2.241	21.632	0.804
9467	67.134	0.7623	2.237	22.900	0.788
12389	82.214	0.7305	2.248	23.479	0.785
15273	96.245	0.7137	2.257	24.179	0.780
18127	110.426	0.7038	2.283	24.895	0.782

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและใบบิด, CR = 10: y = 4

Re	Nu _a	f _a	Nu _a /Nu _o	f _a /f _o	enhancement efficiency
3722	31.111	0.6983	2.060	16.587	0.808
6464	46.779	0.6543	2.064	17.857	0.790
9351	61.627	0.6347	2.073	19.006	0.777
12265	75.393	0.6122	2.077	19.628	0.770
15149	88.387	0.6029	2.085	20.385	0.763
17986	100.026	0.5818	2.080	20.540	0.759

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและไบบิต, CR = 4: y = 5

Re	Nu _a	f _a	Nu _a /Nu _o	f _a /f _o	enhancement efficiency
3695	36.602	1.2273	2.436	29.099	0.792
6511	55.966	1.1809	2.456	32.288	0.771
9456	73.697	1.1697	2.458	35.127	0.751
12365	89.951	1.1578	2.463	37.197	0.738
15115	105.167	1.1421	2.485	38.594	0.735
17853	119.476	1.1393	2.498	40.146	0.729

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและไบบิต, CR = 6: y = 5

Re	Nu _a	f _a	Nu _a /Nu _o	f _a /f _o	enhancement efficiency
3705	33.541	0.8751	2.228	20.764	0.811
6514	50.617	0.8549	2.221	23.377	0.777
9432	67.307	0.8148	2.249	24.455	0.775
12372	82.277	0.8163	2.252	26.230	0.758
15245	96.355	0.8118	2.262	27.493	0.750
18050	109.285	0.7897	2.266	27.903	0.747

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและใบบิด, CR = 8: y = 5

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3728	31.727	0.7556	2.098	17.957	0.801
6528	48.325	0.7116	2.117	19.468	0.787
9434	63.180	0.6722	2.111	20.174	0.775
12359	77.772	0.6583	2.131	21.147	0.770
15186	91.249	0.6346	2.149	21.471	0.773
18010	104.239	0.6250	2.165	22.071	0.772

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

กรณีใส่ลวดขดและใบบิด, CR = 10: y = 5

Re	Nu_a	f_a	Nu_a/Nu_o	f_a/f_o	enhancement efficiency
3723	29.720	0.6399	1.967	15.202	0.794
6493	45.177	0.6118	1.987	16.715	0.777
9426	59.000	0.5910	1.973	17.734	0.756
12361	73.389	0.5729	2.010	18.405	0.761
15262	85.683	0.5558	2.010	18.826	0.756
18102	98.311	0.5478	2.034	19.371	0.758

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีท่อผิวเรียบ (smooth tube)

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (mm-water)
6	27.9	87.5	99.4	119.9	132.4	144.7	153.1	156.3	161.0	156.3	146.0	117.8	0.23
10	28.6	73.2	91.4	107.4	116.2	124.0	130.7	134.0	137.5	136.2	129.5	107.0	0.60
14	29.4	65.0	84.8	98.1	104.7	109.9	115.3	118.6	121.0	121.5	117.1	98.4	1.10
18	31.5	59.3	77.8	89.3	93.9	96.8	100.4	102.9	105.0	107.2	105.3	91.4	1.70
22	32.9	56.0	73.6	83.8	87.6	89.3	92.1	94.2	96.0	98.9	98.1	86.5	2.40
26	34.6	54.6	71.0	80.5	83.6	84.7	87.2	89.0	90.6	93.5	93.4	83.1	3.20
30	36.2	54.0	69.7	78.7	81.4	82.1	84.5	86.2	87.6	90.5	90.8	81.2	4.10



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีได้वादุด, CR=4

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	25.8	82.7	76.1	86.8	91.2	94.9	100.2	105.3	109.4	116.6	115.5	100.4	0.10
8	25.9	75.8	72.4	81.2	84.5	86.8	91.7	95.8	99.4	106.6	106.8	94.7	0.18
10	26.4	69.1	68.3	75.6	78.0	79.3	83.5	87.4	90.1	96.8	98.0	88.1	0.28
12	26.8	64.7	65.6	72.1	73.9	74.7	78.4	81.6	84.0	90.1	91.7	83.3	0.40
14	27.5	61.1	63.4	69.1	70.6	70.9	74.4	77.1	79.1	84.8	86.9	79.5	0.55
16	28.3	58.1	61.4	66.7	67.8	67.7	70.8	73.2	75.0	80.1	82.4	75.7	0.72
18	29.2	56.1	60.0	65.0	65.7	65.5	68.4	70.4	72.0	76.8	79.1	73.1	0.90
20	30.4	54.7	58.9	63.4	64.1	63.8	66.5	68.2	69.7	74.0	76.4	70.9	1.10
22	31.4	54.0	58.3	62.9	63.2	62.9	65.4	66.9	68.2	72.1	74.7	69.6	1.35
24	32.9	53.3	57.5	61.8	62.1	61.6	64.0	65.4	66.5	70.0	72.6	68.1	1.60

ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด
กรณีได้वादขาด, CR=6

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.3	85.0	75.9	87.2	92.1	96.7	102.4	107.3	111.6	118.6	116.7	101.1	0.08
8	27.1	77.7	71.5	80.9	84.6	87.7	93.3	97.6	101.2	109.0	108.3	95.6	0.14
10	27.3	70.9	67.4	75.6	78.4	80.4	85.2	88.8	91.8	99.8	99.8	89.0	0.22
12	27.7	65.2	63.9	71.1	73.2	74.5	78.8	81.4	83.9	91.7	92.1	83.0	0.32
14	28.3	61.3	61.3	67.9	69.6	70.2	73.6	76.0	78.3	85.4	86.2	78.1	0.43
16	29.3	58.6	59.3	65.8	67.1	67.3	70.6	72.3	74.4	80.9	81.9	74.6	0.56
18	30.0	56.8	58.2	64.1	65.2	65.2	68.0	69.7	71.5	77.7	78.9	72.1	0.71
20	31.4	55.6	57.3	63.1	64.0	63.8	66.3	67.6	69.2	75.0	76.3	70.0	0.87
22	32.7	54.7	56.7	62.3	63.1	62.5	65.0	66.2	67.6	72.9	74.4	68.5	1.06
24	33.6	54.0	56.3	61.6	62.2	61.5	64.1	65.0	66.4	71.4	72.9	67.4	1.25

ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ตัวชุด, CR=8

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.3	83.4	75.0	85.6	89.5	93.7	99.2	103.8	108.4	117.3	115.4	100.1	0.07
8	27.3	78.0	72.1	81.2	83.9	86.9	91.7	96.0	100.1	109.2	108.3	95.7	0.12
10	27.5	71.5	68.7	76.5	78.5	80.2	84.0	87.8	91.3	100.2	100.0	89.7	0.18
12	27.9	65.8	65.2	72.1	73.5	74.4	77.7	80.7	83.6	92.0	92.4	83.8	0.26
14	28.6	61.8	62.8	69.4	70.5	70.6	73.5	75.6	78.2	86.1	86.9	79.2	0.35
16	29.4	58.9	60.9	67.1	67.9	67.7	70.3	72.1	74.2	81.5	82.5	75.6	0.45
18	30.5	56.8	59.5	65.3	66.1	65.5	67.9	69.2	71.2	77.9	79.0	72.6	0.57
20	31.3	55.6	58.8	64.3	64.8	64.2	66.3	67.5	69.1	75.5	76.8	70.9	0.70
22	32.3	54.8	58.3	63.4	64.0	63.1	65.0	66.2	67.7	73.7	75.0	69.5	0.85
24	33.3	54.0	57.7	62.7	63.0	62.2	64.2	65.0	66.4	71.9	73.3	68.4	1.00

ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด
กรณีได้วอดชุด, CR=10

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.8	85.2	78.7	88.7	93.2	97.9	102.4	106.3	110.2	118.9	117.7	102.6	0.06
8	27.8	79.5	75.9	84.2	87.6	90.9	94.7	98.9	102.0	110.9	110.6	97.9	0.10
10	28.1	72.6	72.3	79.1	81.5	83.5	86.9	90.2	92.7	101.4	101.9	91.6	0.15
12	28.4	66.9	68.9	74.7	76.3	77.6	80.8	83.3	85.2	93.4	94.3	85.7	0.21
14	29.0	62.6	66.3	71.3	72.4	73.1	75.8	77.7	79.3	86.9	88.1	80.6	0.28
16	29.8	59.7	64.0	68.9	69.7	70.2	72.6	74.0	75.3	82.3	83.7	76.9	0.36
18	30.4	57.6	62.5	67.1	67.6	67.9	70.0	71.2	72.3	78.8	80.4	74.4	0.45
20	31.6	56.1	61.4	65.9	66.4	66.4	68.3	69.2	70.3	76.2	78.0	72.2	0.55
22	32.3	55.0	60.6	64.7	65.0	64.9	66.7	67.6	68.5	74.1	75.9	70.6	0.68
24	33.2	54.3	59.9	63.9	64.0	63.9	65.5	66.4	67.1	72.4	74.2	69.3	0.78

ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีได้เปิด, $y = 3$

Q (m^3/min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (mm-water)
6	27.1	82.0	80.6	93.9	99.3	103.1	106.4	111.5	117.1	123.4	120.4	102.5	0.7
10	27.5	67.9	73.8	84.2	87.4	88.8	90.6	95.0	99.3	105.9	104.7	91.1	1.6
14	28.1	58.9	66.9	76.1	78.5	78.5	79.8	82.9	86.5	92.0	92.0	80.6	2.9
18	29.4	54.7	63.9	71.8	73.5	72.9	74.1	77.0	80.0	85.1	85.6	76.1	4.6
22	30.9	52.4	62.1	69.1	70.5	69.4	70.6	73.5	75.9	80.6	81.5	73.1	0.26
26	32.8	51.2	60.9	67.4	68.4	67.1	68.3	70.8	72.9	77.2	78.5	70.9	0.35



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ใบปิด, $y = 4$

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (mm-water)
6	27.2	80.1	80.3	93.2	98.1	103.3	107.3	111.5	116.6	122.7	118.9	101.8	0.6
10	27.6	68.2	74.5	84.5	87.6	90.6	93.8	97.3	101.2	108.3	106.4	93.1	1.4
14	28.2	59.7	68.8	77.0	78.8	80.1	82.8	85.5	88.4	95.3	94.8	84.3	2.6
18	29.9	54.1	63.2	70.7	72.1	72.4	74.7	76.2	78.7	84.5	84.8	75.7	4.0
22	31.0	52.0	61.7	68.6	69.5	69.5	71.8	73.1	75.1	80.6	81.2	73.3	5.8
26	33.9	51.2	60.4	66.9	67.5	67.2	69.1	70.0	71.6	76.5	77.4	70.4	0.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันสถ

กรณีใส่ไปบิต, y = 5

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (mm-water)
6	26.9	77.1	80.6	94.1	101.0	106.2	111.5	112.4	116.4	120.4	118.1	100.8	0.5
10	27.1	66.8	75.6	86.9	91.7	94.9	99.4	100.1	103.0	107.5	107.1	93.5	1.2
14	27.7	59.0	70.0	79.7	83.0	84.2	87.1	87.7	90.2	94.6	95.5	84.5	2.2
18	28.5	55.2	67.2	75.6	78.3	78.7	81.2	82.1	83.9	88.3	89.6	80.4	3.5
22	30.6	52.6	64.3	71.8	73.8	73.3	75.4	76.3	77.8	81.8	83.7	75.9	4.9
26	32.0	51.4	62.9	70.0	71.6	70.8	72.9	73.6	75.0	78.7	80.8	73.6	0.26



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ตัวลดและใบบิด, CR = 4: y = 3

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.2	87.0	64.2	71.6	75.0	79.1	86.6	92.9	97.5	107.0	107.4	95.0	0.26
10	28.0	71.2	58.7	64.0	65.5	67.6	73.4	78.1	81.2	89.4	91.5	83.5	0.73
14	29.8	62.3	54.9	59.2	60.1	61.0	65.5	68.8	71.0	77.5	80.0	74.0	1.42
18	31.6	57.4	52.7	56.5	57.0	57.3	61.0	63.4	65.2	70.7	73.3	68.7	2.36
22	33.9	55.6	52.1	55.9	56.2	55.9	59.5	61.3	62.7	67.5	70.1	66.1	3.50
26	36.5	54.8	52.1	55.8	56.0	55.5	58.7	60.1	61.3	65.6	68.2	64.6	4.85



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ลดขนาดและใบพัด, CR = 6: y = 3

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.8	89.8	70.4	78.5	82.1	85.3	92.0	98.9	103.5	113.3	113.2	98.8	0.18
10	28.3	72.8	63.0	68.8	70.8	71.6	76.7	81.8	84.9	94.1	96.2	87.0	0.50
14	29.1	62.3	57.5	62.2	63.4	62.9	66.7	70.3	72.6	80.1	82.7	76.1	0.98
18	31.0	57.6	55.0	59.2	60.0	59.1	62.2	65.0	66.7	73.0	75.8	70.3	1.60
22	33.5	55.3	54.0	58.1	58.5	57.4	60.0	62.2	63.6	68.9	71.8	67.0	2.39
26	35.2	54.2	53.6	57.5	57.7	56.5	58.9	60.8	62.0	66.8	69.8	65.5	3.30



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีได้วัดค่าและใบปิด, CR = 8; y = 3

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.8	87.0	70.9	78.9	82.0	85.6	92.3	97.6	102.2	110.8	110.6	96.8	0.150
10	28.0	72.5	65.5	70.7	72.0	73.8	79.1	83.4	86.5	94.7	96.5	87.6	0.410
14	29.5	62.0	60.2	63.9	64.4	64.9	68.8	71.5	73.7	80.3	82.7	76.1	0.800
18	31.0	56.9	57.1	60.3	60.4	60.2	64.0	65.6	67.2	72.5	75.0	69.6	1.300
22	33.9	55.0	55.9	59.2	59.3	58.8	61.6	62.8	64.3	68.8	71.2	66.3	1.900
26	35.9	54.0	55.3	58.4	58.4	57.7	60.5	61.3	62.5	66.4	69.0	64.7	2.620



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ลดขนาดและใบปิด, CR = 10: y = 3

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.9	85.3	73.5	80.5	82.7	85.9	93.0	98.7	103.0	110.9	110.5	96.5	0.130
10	27.8	68.8	66.6	70.6	71.0	71.8	77.3	81.3	84.3	91.7	93.1	83.8	0.350
14	28.4	60.8	62.5	65.2	64.8	64.5	69.1	72.3	74.4	80.8	82.9	76.0	0.650
18	29.5	56.0	59.7	61.7	60.9	60.1	64.2	66.7	68.2	73.7	76.1	70.7	1.050
22	31.4	53.4	57.9	59.7	58.7	57.6	61.2	63.0	64.3	69.1	71.5	66.8	1.550
26	33.5	52.3	56.9	58.7	57.7	56.4	59.4	61.0	62.1	66.4	68.9	64.7	2.100



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ขนาดและไบบิด, CR = 4: y = 4

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.9	88.0	66.7	74.6	77.3	80.4	88.4	94.1	98.7	108.5	108.9	95.7	0.23
10	28.4	71.4	60.3	65.5	66.8	67.8	73.8	77.8	80.9	89.5	91.5	83.4	0.64
14	29.4	62.0	55.9	60.0	60.4	60.5	65.5	68.5	70.6	77.6	80.1	74.3	1.26
18	31.7	57.7	53.7	57.9	58.0	57.7	61.9	63.7	65.5	71.2	73.7	68.5	2.08
22	34.6	56.1	53.3	57.3	57.4	56.8	60.5	61.8	63.4	68.2	70.7	66.1	3.08
26	37.8	55.9	53.7	57.7	57.8	56.8	60.4	61.2	62.5	66.7	69.1	65.0	4.30



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ลวดขดและไอบิด, CR = 6: y = 4

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.1	86.0	67.2	75.1	79.1	82.5	89.3	95.4	100.0	109.4	109.3	95.3	0.17
10	27.5	71.5	62.2	67.8	69.7	70.9	76.6	81.3	84.5	93.5	95.2	85.6	0.46
14	28.7	62.2	58.1	62.3	63.2	63.4	67.9	71.3	73.5	81.1	83.4	76.4	0.90
18	30.5	57.4	55.6	59.1	59.6	59.2	63.1	65.8	67.3	73.8	76.4	70.8	1.47
22	32.6	55.1	54.4	57.7	57.9	57.4	60.9	62.9	64.1	69.8	72.4	67.5	2.20
26	36.0	54.6	54.2	57.6	57.7	57.0	60.1	61.4	62.5	67.3	69.9	65.2	3.00



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดัน

กรณีใส่ขวดและปิด, CR = 8: y = 4

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.3	85.5	69.7	77.0	80.3	83.8	91.3	96.8	101.2	110.2	110.0	95.3	0.14
10	27.2	69.8	63.5	68.2	69.5	70.8	76.9	81.0	83.8	92.4	94.1	84.3	0.39
14	29.5	62.3	60.1	63.7	64.4	64.7	69.8	72.7	74.7	82.1	84.5	76.8	0.75
18	31.0	57.7	57.7	60.5	60.8	60.5	65.1	67.3	68.7	75.1	77.7	71.6	1.20
22	32.3	55.3	56.4	58.9	58.7	58.3	62.6	64.4	65.3	71.4	74.1	68.9	1.76
26	34.7	54.0	55.6	57.9	57.7	56.8	60.7	62.1	62.7	67.9	70.6	66.0	2.43



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่ลดขนาดและไปบิต, CR = 10: y = 4

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.8	83.8	69.8	78.5	82.2	85.7	92.7	98.7	103.1	110.7	109.9	94.3	0.120
10	28.6	72.0	66.6	72.3	74.3	75.6	81.8	86.9	89.9	98.0	99.0	88.1	0.320
14	29.5	63.7	63.3	67.4	68.2	68.3	73.4	77.0	79.1	86.2	88.3	80.2	0.620
18	31.0	58.7	60.8	64.1	64.3	63.6	68.0	70.5	72.1	78.3	80.7	74.1	1.000
22	32.6	56.0	59.2	62.1	61.9	60.9	64.9	66.7	68.0	73.5	76.2	70.4	1.480
26	34.4	54.6	58.3	61.0	60.7	59.5	63.2	64.6	65.6	70.6	73.4	68.1	2.000



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่หลอดและไปบิต, CR = 6: y = 5

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	27.9	86.5	69.4	78.0	81.8	85.7	92.5	98.6	103.1	111.5	110.8	95.8	0.15
10	27.9	71.8	63.9	69.4	71.5	73.4	79.2	84.2	87.3	95.8	97.1	87.2	0.42
14	29.1	63.2	59.9	64.0	64.8	65.5	70.4	74.4	76.4	83.9	86.0	79.1	0.80
18	31.0	58.0	56.8	60.5	61.0	61.0	65.0	68.0	69.7	76.0	78.2	72.3	1.34
22	33.7	55.6	55.3	58.9	59.2	58.7	62.2	64.5	65.8	71.2	73.3	68.2	2.00
26	35.9	54.7	54.9	58.4	58.4	57.9	61.0	62.9	64.0	68.9	71.2	66.4	2.72



ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิและความดันลด

กรณีใส่วาล์วและไบริด, CR = 10: y = 5

Q (m ³ /min)	Ti (C°)	To (C°)	T1 (C°)	T2 (C°)	T3 (C°)	T4 (C°)	T5 (C°)	T6 (C°)	T7 (C°)	T8 (C°)	T9 (C°)	T10 (C°)	Δh (inch-water)
6	28.1	82.6	72.1	80.8	83.6	86.1	92.6	97.8	102.2	109.7	109.3	94.0	0.110
10	28.1	70.4	67.9	73.6	74.8	75.2	80.9	85.5	88.4	96.0	97.5	86.8	0.300
14	28.7	61.4	63.6	67.7	67.8	67.1	71.8	75.1	77.1	83.7	86.0	78.0	0.580
18	30.0	56.8	60.5	64.1	63.5	62.4	66.6	68.8	70.3	75.9	78.5	71.9	0.940
22	31.7	54.2	58.7	61.9	61.0	59.6	63.4	65.2	66.4	71.5	74.1	68.4	1.370
26	34.0	53.2	57.7	60.8	59.8	58.2	61.6	63.0	64.0	68.5	71.1	66.0	1.890





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ME NETT

21st

การประชุมวิชาการ

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21

วันที่ 17 - 19 ตุลาคม 2550

ณ โรงแรมเวลด์ม จอมเทียน บีช จ.ชลบุรี



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์
กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ



ผู้สนับสนุนหลัก



ผู้ร่วมสนับสนุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่มีสปริง

Enhancement of Heat Transfer in a circular tube fitted with coil wires

วิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง^{1*} สมิทธี เอี่ยมสะอาด² ดำริห์ จันทรแสงสุข¹ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 *อีเมล boy_8013@hotmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10500

โทร 0-2988-3666 ต่อ 24 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 24

Witoon Chingtuaythong^{1*} Smith Eiamsa-ard² Dumri Jansangsuk¹ and Pongjet Promvonge¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

10520 Tel 0-2326-4197 Fax 0-2326-4198 * E-mail: boy_8013@hotmail.com

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakom University of Technology, Bangkok 10530

Tel 0-2988-3666 ext. 24 Fax 0-2988-3666 ext. 24

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการติดตั้งสปริงรูปแบบต่างๆภายในท่อที่หน้าตัดคงที่ที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat flux) ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระยะพิท (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดสปริง (d), PR, การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในท่อกลมที่ใช้ทดสอบ อัตราการไหลของอากาศทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) จะอยู่ช่วงระหว่าง 10,000 – 60,000 ที่ระยะ PR = 6, 8 และที่อัตราส่วน CPR = 8:6:4 และ CPR = 10:8:6:4 จัดวางสลับกัน โดยผลที่ได้จะทำการศึกษาร่วมกับการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยการเพิ่มของตัวเลขเรย์โนลด์และระยะ PR ที่สูงขึ้น

Keywords: การถ่ายเทความร้อน, สปริง, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Abstract

This paper presents an experimental study of heat transfer enhancement in a circular tube fitted with wire coils at a constant heat flux. Effects of ratio of pitch (P) to coil-wire diameter (d), PR, on heat transfer and friction loss in the tube are experimentally investigated. The air flow rate in this work is based on the Reynolds number at the tube inlet ranging from 10,000 to 60,000. The wire coils inserted are at PR = 6, 8 and at two varying combined pitch ratio, CPR = 8:6:4 and CPR = 10:8:6:4. The experimental result reveals that the heat transfer rate and friction loss from using the coil wires increase considerably with increasing Reynolds number and PR values.

Keywords: heat transfer, coil wires, friction factor, heat transfer coefficient

สัญลักษณ์

\dot{W}_m = พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศ, W

Q = อัตราการไหลของของไหล, m^3/s

Δp = ความดันตกคร่อมของของไหล, N/m^2

f = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

L = ความยาวท่อ, m

\bar{V} = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m

Nu_D = ค่าตัวเลขนัสเซลล์

d = เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวด, m

P = ระยะพิท, m

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s

PR = อัตราส่วนพิทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดที่ระยะพิทคงที่ (P/d)

CPR = อัตราส่วนพิทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดที่ระยะพิทไม่คงที่ (Pn/d)

\dot{Q} = อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

k = สมบัติการนำความร้อน, $W/m.K$

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $kJ/kg.K$

T_i = อุณหภูมิอากาศด้านทางเข้า, °C

T_o = อุณหภูมิอากาศด้านทางออก, °C

h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$

A_s = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2

T_w = อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, °C

ΔT_{lm} = ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอค (LMTD)

Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์

μ = ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ, $kg/m \cdot s$

1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการพัฒนาเพื่อต้องการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและต้นทุนในการผลิตในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนยังสูงอยู่ ซึ่งตัวแปรสำคัญในการลดขนาดและค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นหรือการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนหรือการสร้างความปั่นป่วนของของไหลเป็นเทคนิคแบบหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งในทางปฏิบัติสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้ ซึ่งเทคนิคการสร้างการไหลแบบหมุนวนสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง (continuous swirl flow) และการไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น (decaying swirl flow) การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่องจะเกิดการหมุนวนตลอดความยาวของท่อ ในขณะที่การไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้นจะเกิดการหมุนวนสูงสุดที่บริเวณช่วงต้นท่อและค่อยๆเสื่อมสลายลงตามแนวแกนการไหล

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้สปริงติดตั้งภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนภายในท่อซึ่งมีรูปแบบการไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้เกิดการหมุนวนของไหลตลอดความยาว ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยสปริงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจที่ใช้ในการศึกษาในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยข้อมูลที่ศึกษาจะนำไปเผยแพร่เกี่ยวกับเทคนิคแบบนี้ อุปกรณ์แบบแผ่นบิดเป็นที่สนใจมากกว่าอุปกรณ์แบบสปริง เพราะอุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบสทหพันธ์ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ช่วงการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน และการไหลแบบปั่นป่วน ศึกษาโดย Novozhilov and Migai [1] การสร้างสหพันธ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อที่ใช้สปริงในการไหลแบบปั่นป่วน การถ่ายเทความร้อนโดยการติดตั้งสปริงภายในท่อโดยใช้สาร non-Newtonian fluid โดย Oliver and Shoji [2]. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สปริงหลายรูปแบบในการความคิดพื้นฐานในการวิเคราะห์ exergy โดย Prasad and Shen [3]. Arici and Asan [4]

สำหรับบทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยทดสอบที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) จะอยู่ช่วงระหว่าง 10,000 – 60,000 โดยการเว้นช่วงระยะพิค (P) สปริงที่ติดตั้งภายในท่อทดสอบที่ PR = 8, 6 และ CPR = 8:6:4, 10:8:6:4 ต่อการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามรูปที่ 1

2. ทฤษฎี

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อกลมหน้าตัดวงกลมที่มีการติดตั้งสปริงภายในจำเป็นจะต้องพิจารณา ทั้งในส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัลลัมและการถ่ายเทความร้อนให้กับ

อากาศที่ไหลผ่าน โดยพลังงานที่พัลลัมใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านท่อกลมสามารถพิจารณาได้คือ

$$\dot{W}_{in} = Q\Delta p \quad (1)$$

$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D} \quad (2)$$

$$\Delta p = \rho_{water} g h \quad (3)$$

การสมมูลพลังงานกรณีพัลลัมความร้อนคงที่ (Constant Heat flux)

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_i - T_o) = h A_s \Delta T_{lm} \quad (4)$$

โดยที่
$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_o - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_i)} \quad (5)$$

ค่าตัวเลขนัสเซลต์ (Nusselt Number, Nu_D)

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (6)$$

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Raynold number, Re)

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (7)$$

ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (η)

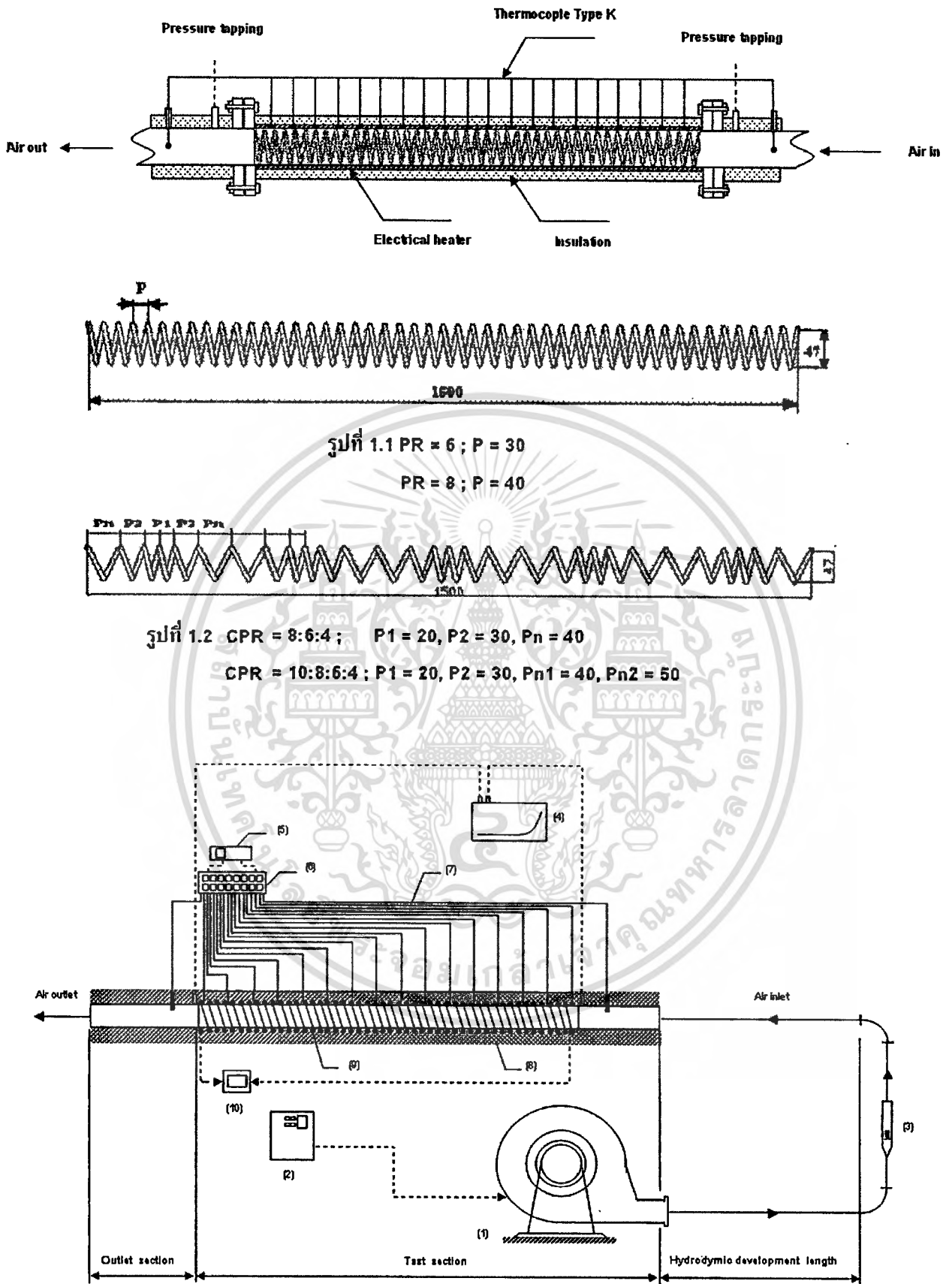
$$\eta = (Nu/Nu_o) / (f/f_o)^{1/3} \quad (8)$$

3. อุปกรณ์ทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ (1) โดยใช้เครื่องกำเนิดลม (Blower) (1) ขนาดพิกัด 10 HP เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณลมไหลเข้าเครื่องทดสอบโดยเครื่องควบคุมการจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้า (Inverter) ของเครื่องกำเนิดลม (2) โดยปริมาณลมแต่ละช่วงการทดลองจะถูกวัดโดยเครื่องมือวัดความเร็ว (Rota meters) (3) อากาศที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบจะต้องไหลผ่านท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เท่าเครื่องทดสอบ และ มีระยะเท่ากับ Hydrodynamic development length ซึ่งมีหน้าที่ทำให้การไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่ชุดทดสอบมีลักษณะเป็นการไหลแบบ fully Develop และไหลเข้าเครื่องทดสอบ โดยเครื่องทดสอบได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน (Electrical Heater) ที่มีพัลลัมความร้อนคงที่ (9) ตลอดความยาวท่อขนาด 1000 วัตต์

ชิ้นงานที่ทดสอบประกอบด้วยสปริงขนาดต่างๆ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวคงที่ขนาด 5 มิลลิเมตร และ 1500 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีการปรับระยะพิคขนาดต่างๆ ซึ่งได้ใส่ไว้ในเครื่องทดสอบ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวคงที่ขนาด 47 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1. ชุดทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (1) Blower (2) Inverter (3) Rota meter (4) manometer (5) Digital thermometer (6) multi-channel selectors (7) Thermocouples (8) Insulation (9) Heating coil (10) Volt meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และยาว 1500 มิลลิเมตรตามลำดับ ได้มีการให้ความร้อนด้วย Electrical Heater ขนาด 1,000 วัตต์ ซึ่งลักษณะของสปริงที่ใส่ภายในท่อมี 4 แบบ ประกอบด้วย สปริงที่มีระยะ PR = 6, PR = 8, CPR = 8:6:4 และ CPR = 10:8:6:4 โดยอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าออกเครื่องทดสอบ และอุณหภูมิที่ผิวของท่อได้ถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวนรวมทั้งสิ้น 16 จุด โดยวัดค่าจากอุปกรณ์ Digital thermometer ส่วนค่าความดันตกคร่อมตรวจวัดโดยอุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม (manometer)

เครื่องทดสอบจะต้องมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจาก Electrical Heater ไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก

4.วิธีการทดลอง

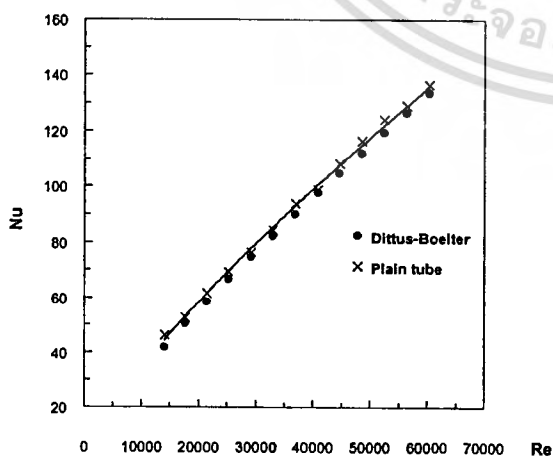
การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อกลม โดยศึกษาจากการใส่สปริงแบบต่างๆ ที่มีการกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวคงที่ โดยการปรับเปลี่ยนระยะ PR แบบต่างๆ

เริ่มต้นการทดลองโดยการเปิดเครื่องกำเนิดลม (Blower) จากนั้นทำการปรับปริมาณการไหลของอากาศให้ได้ตามที่ต้องการ โดยควบคุมอัตราการไหล (Q) ให้อยู่ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 10000 - 60000 โดยในแต่ละช่วงที่ทดสอบ จะต้องรอให้อุณหภูมิผิวท่อและอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกของท่อที่ก่อนทำการบันทึกค่า โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิผิวท่อทั้งหมด 14 จุดและอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของท่ออีก 2 จุด ในขณะเดียวกันก็ทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อมด้วย

5.ผลการทดลอง

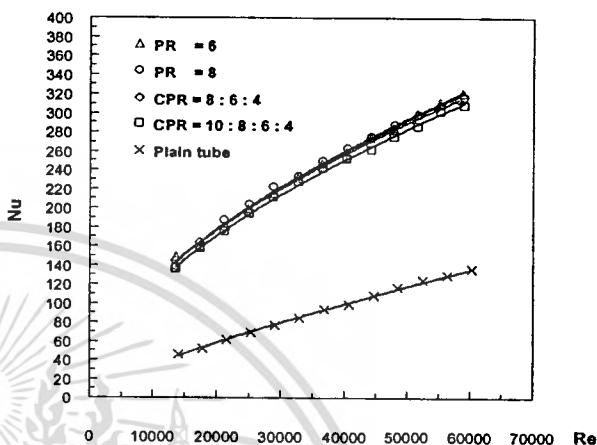
ผลของการทดลองแสดงในรูปความสัมพันธ์ต่างๆได้ดังนี้

จากรูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 10,000 < Re < 60,000 และค่าตัวเลขนัสเซลล์ (Nusselt numbers; Nu) เป็นการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลล์ที่ได้จากการทดสอบท่อเปล่ากับสพหพันธ์ของ Dittus - Boelter ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะเห็นว่าค่าตัวเลขนัสเซลล์มีความสัมพันธ์กัน



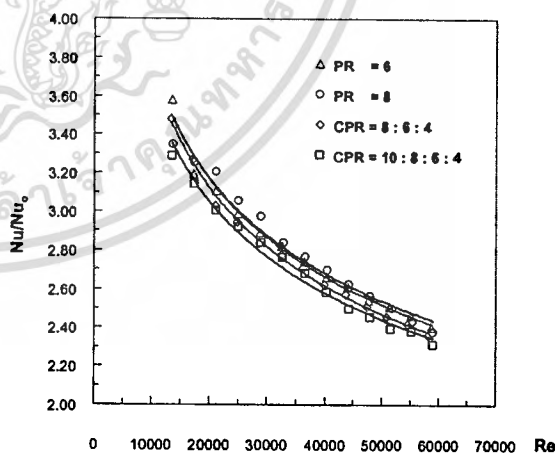
รูปที่ 2. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และ ตัวเลขนัสเซลล์

จากรูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 10,000 < Re < 60,000 และค่าตัวเลขนัสเซลล์ (Nusselt numbers; Nu) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งสปริงภายในและมีการจัดวางระยะ PR ต่างๆ จากการเปรียบเทียบกับสปริงที่ระยะ PR ต่างๆพบว่าที่ระยะ PR = 8, 6 และ CPR = 8:6:4 ค่า Nu จะมีค่าใกล้เคียงกันที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน แต่ที่ระยะ CPR = 10:8:6:4 ค่า Nu จะมีค่าต่ำสุด



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และตัวเลขนัสเซลล์

จากรูปที่ 4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีการติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนต่อท่อเปล่าในช่วง 10,000 < Re < 60,000 จะพบว่า การติดตั้งสปริงจะให้ค่า Nu สูงกว่าท่อเปล่าประมาณ 3.5 เท่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 10000 และค่อยๆลดต่ำลงที่ตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้น



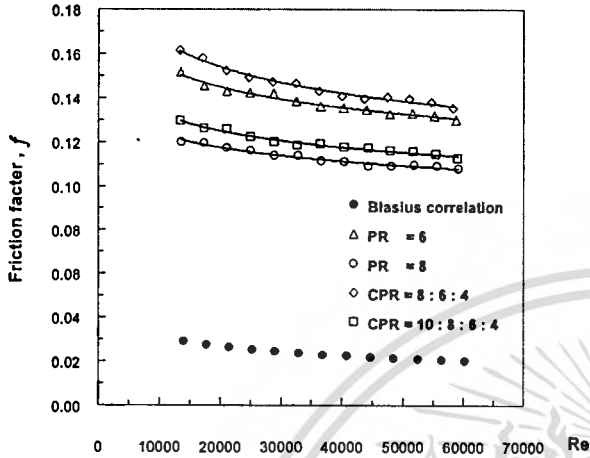
รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลล์

จากรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 10,000 < Re < 60,000 และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor; f) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งสปริงโดยการจัดวางระยะ PR แบบต่างๆ เปรียบเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

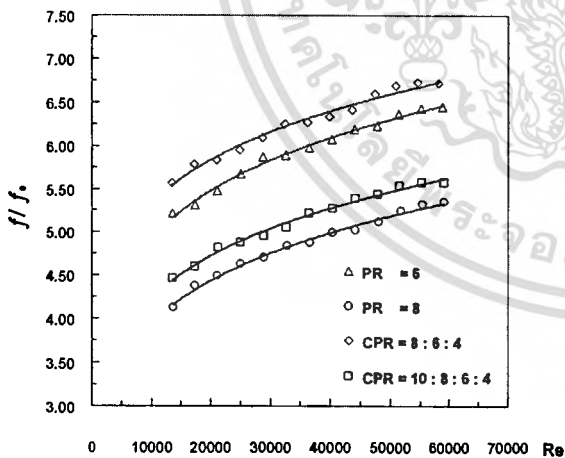
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งสปริงภายใน (ท่อเปล่า) พบว่าที่ระยะ CPR = 8:6:4 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงซึ่งมีผลเนื่องมาจากชิ้นงานทดสอบแบบดังกล่าวมีระยะพิดไม่คงที่และระยะความห่างระหว่างพิดต่อพิดน้อยโดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะ CPR = 10:8:6:4 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าลดลง และที่ระยะ PR = 8 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุดที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน



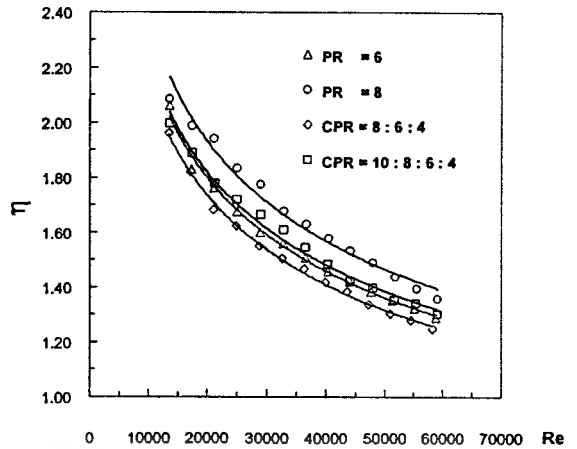
รูปที่ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 6 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีการติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนต่อท่อเปล่าในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ จะพบว่า การติดตั้งสปริงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าท่อเปล่า โดยที่ระยะ CPR = 8:6:4 จะสูงประมาณ 5 - 6 เท่า ซึ่งมีค่าสูงสุด



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และสัดส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 7 พบว่าการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ระยะ PR แบบต่างๆ ในช่วง $10,000 < Re < 60,000$ การติดตั้งสปริงที่ระยะ PR = 8 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะต่างๆ และที่ระยะ CPR = 8:6:4 ประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างต่ำที่ตัวเลขที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน



รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า การติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลของอากาศภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการติดตั้งสปริงภายในท่อจะช่วยเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณผิวท่อและการไหลแบบหมุนวนซึ่งส่งผลให้ค่า Nu มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากที่บริเวณผิวท่อที่เกิดการไหลแบบปั่นป่วนจะมีการไหลที่ช้าลงส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้สูงเมื่อเทียบกับการไหลผ่านท่อเปล่า รวมถึงการจัดวางระยะพิดของสปริงแบบต่างๆ โดยรูปแบบของสปริงที่มีระยะ PR = 8 จะให้ค่า Nu สูงใกล้เคียงกับระยะ PR = 6 และ CPR = 8:6:4 (รูปที่ 3) แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (รูปที่ 5) ที่เกิดเนื่องจากการติดตั้งสปริงภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อจะเห็นได้ว่าที่ระยะ PR = 8 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด (รูปที่ 7) การติดตั้งสปริงภายในท่อโดยการจัดวางระยะ PR แบบต่างๆ จะสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน แต่การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าต่างกัน (รูปที่ 5)

จากการทดลองพบว่า การติดตั้งสปริงภายในท่อจะส่งผลให้ชั้นความหนาของความร้อนบางลงและลดค่าความหนืดบริเวณผิวท่อเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณผิวท่อ ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น โดยการติดตั้งสปริงที่มีระยะ PR = 8 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะ PR ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Novozhilov JF, Migai VK. Intensifying convective heat transfer within tubes by means of induced roughness. *Teplotenergetika* 1964; 11(9):60-3.
- [2] Oliver DR, Shoji Y. Heat transfer enhancement in a round tubes using different tube inserts; non-newtonian fluids. *Journal Chemical Engineering Resource and Design* 1992;70:558-64.
- [3] Prasad RC, Shen J. Performance evaluation using exergy analysis—application to wire-coil inserts in forced convection heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1994;37(15):2297-2303
- [4] Arici ME, Asan H. Enhancement of turbulent flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts. *ASME, PD Advance in Heat Transfer* 1994;64:113-7.
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์ "การถ่ายเทความร้อน" ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542 หน้า 225-252.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายวิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง เกิดเมื่อวันที่ 29 พฤศจิกายน 2523 ที่จังหวัด เพชรบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้