

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ใบพัดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน Enhancement of Heat Transfer by Using Propeller in a Circular Pipe Heat Exchanger

ศราวุธ รัตนวงษ์* สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

โทร 0-2988-3666 ต่อ 241 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 241 * E-mail: koko2523@hotmail.com

Sarawut Rattanawong* Smith Eiamsa-ard

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530

Tel 0-2988-3661 ext. 241 Fax 0-2988-3661 ext. 241 * E-mail: koko2523@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการให้ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยทำการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนแบบใบพัดปรับมุม (propeller) เข้าไปภายในท่อ ซึ่งมีอากาศเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน การทดสอบจะพิจารณาของใบพัด โดยทำการปรับมุม (θ) 30 , 45 และ 60 องศา และจัดวางใบพัดในท่อ ความร้อนในระหว่างระหว่างใบพัดหรือระยะพิท (PR=l/D) ที่แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 5, 7 และ 10 ที่ช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) ระหว่าง 10000 ถึง 50000 ซึ่งเป็นช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ โดยผลที่ได้จะศึกษาผลของตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Numbers, Nu) และค่าความเสียดทาน (Friction Factors, f) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลของการถ่ายเทความร้อนผ่านท่อเปล่าภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน จากผลการทดสอบพบว่าในการใส่ใบพัดเข้าไปในท่อทางการไหล ค่าตัวเลขนัสเซลท์จะสูงมากขึ้นขณะเดียวกันก็มีความเสียดทานที่เกิดขึ้นในท่อมากขึ้น และยังเห็นได้อีกว่าค่าถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ด้วย

คำสำคัญ: ใบพัด, การถ่ายเทความร้อน, ความเสียดทาน, การไหลหมุนวน และระยะพิท

Abstract

In this paper, the study of heat transfer enhancement in a circular pipe heat exchangers. The heat transfer and friction characteristics in the heat exchanger with propellers (swirl generator) inserts are investigated experimentally. The propellers is inserted in the entrance of the test tube which air is used as working fluids in tube side, The experimental is considered by angle at 30 , 45 and 60 degree. Three different pitch ratios (PR) of propellers arrangements in the test tube are introduced with PR = 5, 7 and 10. At the Reynolds number ranging between 10,000-50,000 in each run. Effects of the propellers insert on the heat transfer and friction were investigated, and obtained. Nusselt number(Nu) was compared with exiting results from the plain tubes. The heat transfer results showed that the Nusselt number is a function of Reynolds number and These effects provide which can be seen from the higher values of Nusselt numbers in comparison with the plain tubes.

Keywords : propellers, heat transfer, friction, swirl flow, pitch

สัญลักษณ์

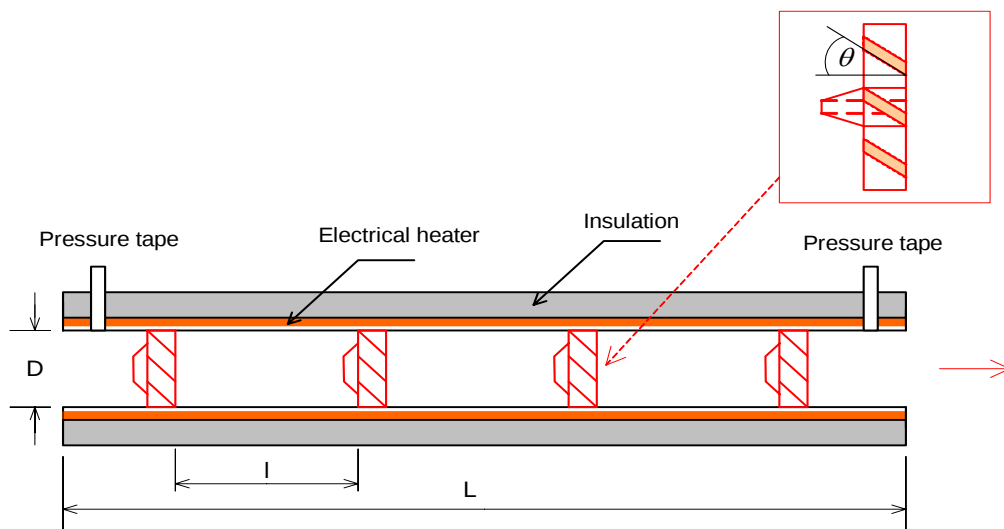
Q อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)	M อัตราการไหลโดยมวล (kg/s)	C_p ค่าความจุความร้อน (kJ/kg.K)
T_i อุณหภูมิทางเข้าของท่อ (K)	T_o อุณหภูมิทางออกของท่อ (K)	T_b อุณหภูมิเฉลี่ย (K)
T_w อุณหภูมิที่ผนังท่อ (K)	$\bar{T}_w$ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังท่อ (K)	$\bar{h}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (W/m ² .K)
k ค่าการนำความร้อน (W/m.K)	A พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m ²)	D เส้นผ่านศูนย์กลางท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (m)
Nu ตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย	Re ตัวเลขเรย์โนลด์	ΔP ความดันตกคร่อม (Pa)
f ความเสียดทาน	V ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ย (m/s)	μ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล (Ns/m ²)
ν ความหนืดจลน์ของของไหล (m ² /s)		

1. บทนำ

ปัจจุบันในงานด้านวิศวกรรมเครื่องกลและงานทางด้านอุตสาหกรรมมักมีกระบวนการการแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่เสมอ และเพื่อให้การใช้พลังงานความร้อนเป็นไปอย่างถูกหลักการและมีประสิทธิภาพ จึงมีการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ขึ้น โดยหลักการก็คือเพื่อให้ระบบมีอุณหภูมิตามที่ต้องการ ซึ่งใช้คุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อน คือ เมื่อสองตำแหน่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันนำมาสัมผัสจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำ ยกตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีระบบทำความเย็น ตู้เย็น หม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น เพราะฉะนั้นการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้เหมาะสมกับประเภทของงานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งและมักมีขีดจำกัดทั้งในด้านขนาดและอัตราการไหลของของไหล ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าไม่สูงมากนัก หากสามารถหาวิธีการที่จะเพิ่มขีดความสามารถในการถ่ายเทได้ ก็จะทำให้สมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงแล้ว พร้อมยังช่วยให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลง และยังทำให้ลดพื้นที่ในการติดตั้งให้น้อยลงด้วย โดยทั่วไปจำแนกแนวทางการช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยกันสองวิธี วิธีแรกคือ วิธี Passive เป็นวิธีที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกมากระตุ้น อันได้แก่ การใช้พื้นผิวที่ได้รับการปรับปรุงสภาพแล้ว (treated surface) การใช้พื้นผิวหยาบ (rough surface) การเพิ่มพื้นผิว (extended surface) การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (swirl flow devices) การใช้เส้นลวดขด (wire coils) เป็นต้น สำหรับวิธีที่สองเป็นแบบ Active ซึ่งต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอก (external power source) อันได้แก่ การใช้อุปกรณ์ทางกล การทำให้เกิดการสั่นของพื้นผิว การทำให้เกิดการสั่นของของไหล

ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใบพัดในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด double pipe โดยทดสอบในช่วงค่า Reynolds numbers ที่ต่ำ ต่อมา Bali และ Ayhan [2] ศึกษาวิธีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อุปกรณ์กำเนิดการหมุนวนชนิดใบพัดแบบเดียวกัน โดยทำการศึกษาการไหลหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น (decaying swirl flow) ชนิดการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่า Nusselt number จะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่อุปกรณ์กำเนิดการหมุนวนเข้าไปหรือเพิ่มค่า Reynolds numbers ที่สูงขึ้น และในปีเดียวกัน Yilmaz และคณะ [3] ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของอากาศที่ถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดการไหลแบบหมุนวนแบบ radial guide vane ใบพัดของเครื่องกำเนิดได้ถูกออกแบบให้สามารถปรับความแรงของการไหลหมุนวนขนาดต่างๆ ได้ ท่อที่ใช้ในการทดสอบได้รับความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าที่พันอยู่รอบๆ ซึ่งมีการหุ้มฉนวนอย่างดี เพื่อทำให้เกิดความร้อนที่ผิวคงที่ จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของการไหลแบบหมุนวนที่มุมใบพัดสูงมากขึ้นจะเพิ่มความเร็วของการหมุนวนและจะสูงกว่าการไหลตามแนวแกนที่ค่า Reynolds numbers ต่ำ จากนั้น Promvong และ Eiamsa-ard [4] เป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่ศึกษาเกี่ยวกับการไหลหมุนวนได้ศึกษาถึงการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการให้ความร้อนที่ผิวคงที่เช่นเดียวกัน โดยใช้ Conical nozzles และเครื่องกำเนิดการไหลหมุนวน (Swirl generator) โดยใช้ชุดหอยโข่ง (Snail) เป็นตัวสร้างการไหลหมุนวนบริเวณทางเข้าของท่อทดสอบ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจึงนำไปสู่แนวคิดที่จะศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยการใช้อุปกรณ์ช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใบพัดตามแนวแกน ขึ้นเนื่องมาจากมุม θ ของใบพัดทำให้เกิดการไหลวนของของไหลซึ่งมีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการเพิ่มและดัดแปลงโดยทดสอบมุมและระยะพิตที่แตกต่างกัน ซึ่งใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน ดังรูปที่ 1

นับตั้ง
แบบหมุนวน



รูปที่ 1 ชุดทดสอบที่มีการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนชนิดใบพัด

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อและค่า Nusselt numbers เฉลี่ย สำหรับการสอตใส่ใบพัดสามารถหาได้ดังนี้ โดยค่าความร้อนที่ได้รับจากของไหลที่ค่า Reynolds numbers ใดๆ คือ

$$Q = MC_p(T_o - T_i) \quad (1)$$

$$Q = \bar{h}A(\bar{T}_w - T_b) \quad (2)$$

เมื่อ

$$T_b = (T_o + T_i) / 2 \quad (3)$$

และ

$$\bar{T}_w = \sum T_w / 14 \quad (4)$$

เมื่อ T_w เป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อ (local wall temperature of the tube) ซึ่งไม่คิดผลกระทบความต้านทานความร้อนที่ผิวท่อเนื่องจากผลของค่าการนำความร้อนของท่อที่สูงและขนาดความหนาของท่อที่บาง โดยจะทำการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยจากทางเข้าถึงทางออกด้วยกัน 14 จุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (average heat transfer coefficient) และ ค่า Nusselt number เฉลี่ย สามารถหาได้ดังนี้

$$\bar{h} = MC_p(T_o - T_i) / A(\bar{T}_w - T_b) \quad (5)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (6)$$

สำหรับของไหลที่อุณหภูมิต่างๆ ค่า Reynolds number หาได้จาก

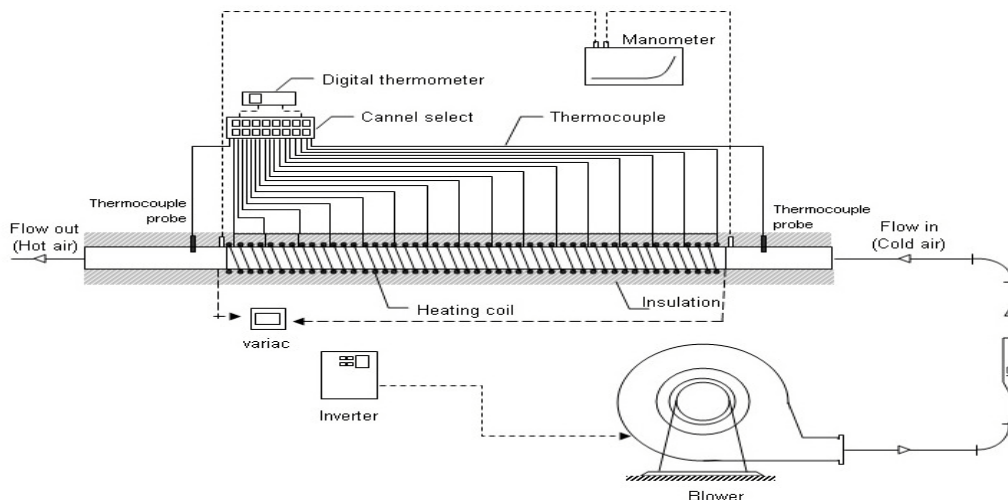
$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (7)$$

และ

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right)\left(\rho \frac{V^2}{2}\right)} \quad (8)$$

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

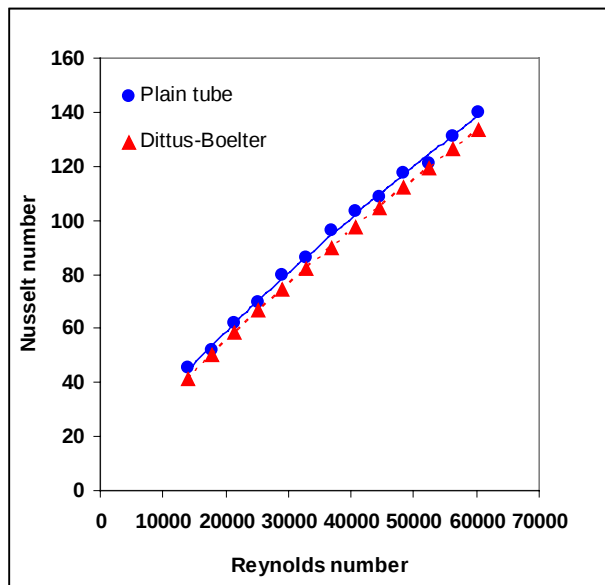
ชุดอุปกรณ์การทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนได้ถูกแสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ในการทดลองอากาศในสภาวะบรรยากาศไหลผ่านท่อที่มีการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อนที่ผิววงที่ ซึ่งทำมาจากทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 47 มิลลิเมตร มีความยาว 1500 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งท่อทดสอบจะทำการหุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนแก่ภายนอกให้น้อยที่สุด โดย variac จะเป็นตัวควบคุมแรงดันและกระแสที่ขดลวดความร้อน โดยค่าแรงดันที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 80 V ในการทดลองการไหลหมุนวนจะถูกสร้างโดยการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนแบบใบพัด สำหรับอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า ทางออก และอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่อจะถูกทำการตรวจวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลแบบเค ซึ่งอุณหภูมิทั้งหมดทำการวัดด้วยเครื่อง Digital thermometer อากาศจากพัดลมจะถูกวัดค่าอัตราการไหลโดยใช้โรตารีมิเตอร์และปรับค่าอัตราการไหลโดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมพัดลม (Blower 10 hp) จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ทางเข้าและออกของท่อจะถูกทำการติดตั้งจุดวัดความดันสำหรับหาค่าความดันตกคร่อมในท่อโดยต่อเข้ากับมานอมิเตอร์สำหรับอ่านค่าผลต่างความสูง ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ อัตราการไหลและความดันตกคร่อมของอากาศภายหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ในระหว่างการทดลองจะทำการปรับค่าอัตราการไหลในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศจากค่าที่ทางเข้าท่ออยู่ระหว่าง 10000 และ 50000 โดยคุณสมบัติต่างๆ ของไหลและการหาค่าตัวเลขนัสเซลท์ จะถูกพิจารณาจากค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยจากสมการที่ 3



รูปที่ 2 ชุดทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อที่มีการใส่อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนชนิดใบพัด

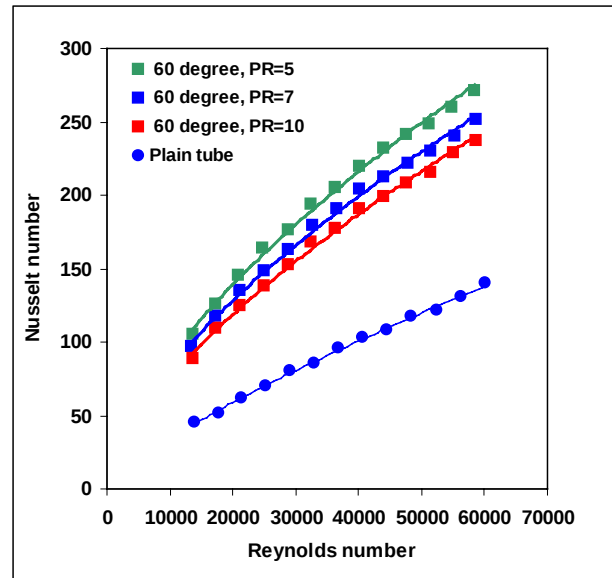
4. ผลการทดลองและบทวิเคราะห์

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้คือศึกษาถึงผลการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดฟลักซ์ความร้อนที่ผิววงที่สำหรับผลที่ได้จากการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการของ Dittus และ Boelter [5] ซึ่งเป็นสมการสำหรับการไหลภายในท่อกลมผิวเรียบ(ท่อเปล่า)

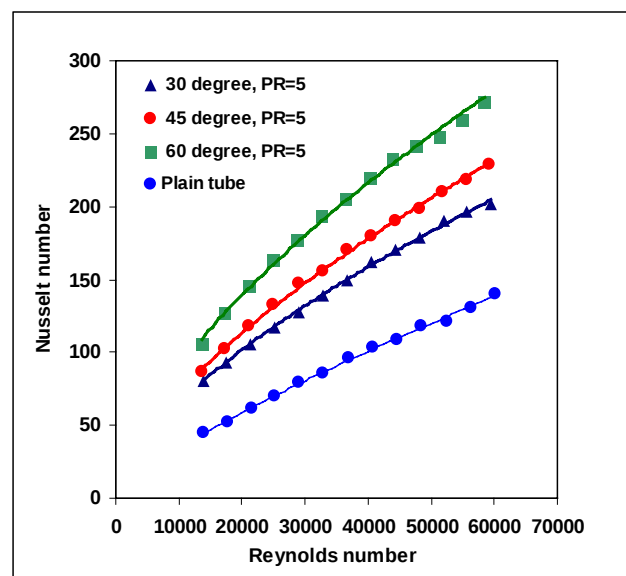


รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลท์กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์สของท่อผิวเรียบ

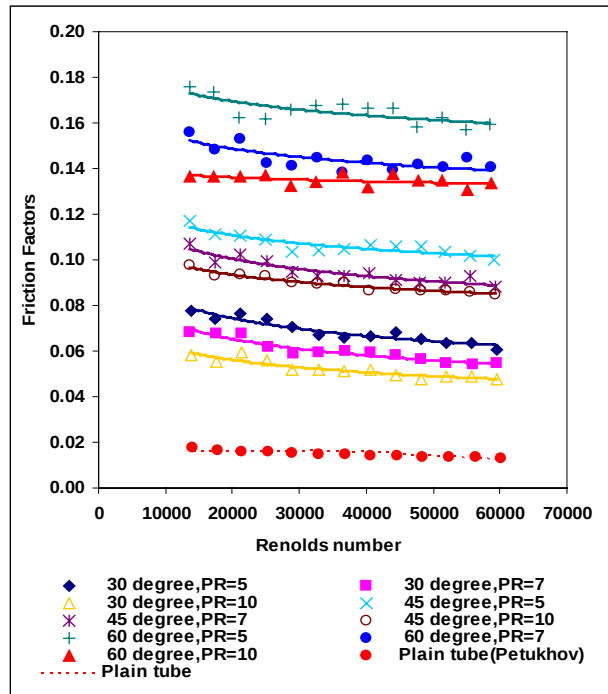
จากรูปที่ 3 แสดงค่าแนวโน้มจากผลการทดลองเทียบกับสมการของท่อเปล่า ซึ่งผลของค่าตัวเลขนัสเซลท์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ส และมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันโดยค่าคลาดเคลื่อนจะอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลท์กับตัวเลขเรย์โนลด์สจากรูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลท์ของอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนแบบใบพัดตามระยะพิท (PR) แตกต่างกันและแบบท่อเปล่า ซึ่งจะเห็นว่าแต่ละระยะค่าตัวเลขนัสเซลท์จะสูงกว่าแบบท่อเปล่า และเมื่อพิจารณาถึงระยะพิทที่ใช้วางใบพัดที่ต่างกัน พบว่าระยะพิทที่น้อยจะทำให้ตัวเลขนัสเซลท์สูงกว่าระยะที่มาก ส่วนรูปแบบของใบพัดที่มุมแตกต่างกัน ค่ามุมของใบพัดที่ทำมุมกับแนวแกนที่สูงกว่าตัวเลขนัสเซลท์ก็จะสูงตามไปด้วย ดังรูปที่ 5

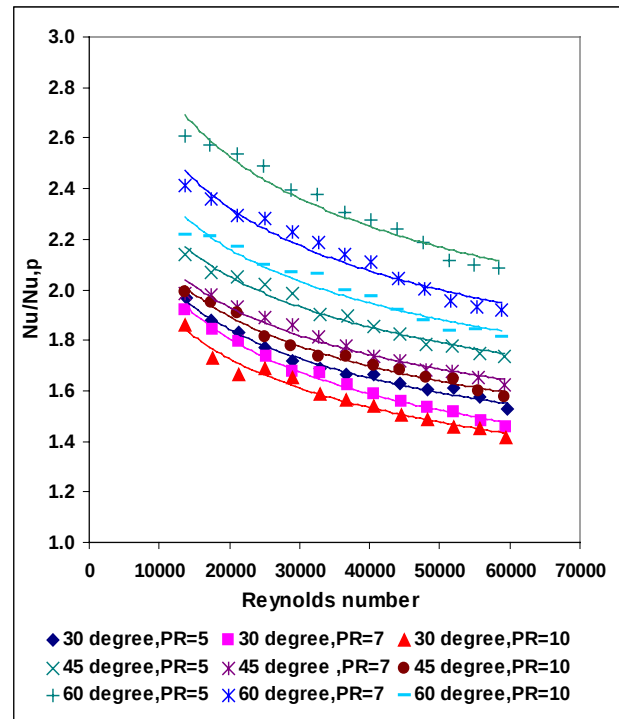


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเซลท์กับตัวเลขเรย์โนลด์สในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้มุมใบพัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์ความเสียดทานกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงผลของแฟกเตอร์ความเสียดทานในแบบต่างๆที่ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการของ Petukhov [6] ซึ่งเป็นสมการสำหรับการไหลภายในที่มีความปั่นป่วนและเป็นท่อเปล่า จะเห็นว่ามุมของใบพัดจะมีผลมากกว่าการวางระยะพัด โดยค่ามุมที่สูงจะเกิดค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานสูงที่สุด อันเนื่องมาจากผลของใบพัดที่ติดกับเส้นทางการไหลสูงกว่า ทำให้เกิดความต้านทานการไหลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาถึงแต่ละระยะพัดที่ใช้ในการวางใบพัด ระยะพัดที่น้อยกว่าค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานจะมีค่าสูงกว่าระยะพัดที่มาก และจากรูปยังแสดงให้เห็นอีกว่าค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานทั้งหมดจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อความเร็วที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นก็คือค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้น ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานจะมีค่าลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเซลท์ของใบพัดแบบต่างๆต่อท่อเปล่ากับค่าตัวเลขเรย์โนลด์

จากรูปที่ 7 ผลของค่าตัวเลขนัสเซลท์ของใบพัดเมื่อเทียบกับท่อเปล่า แสดงให้เห็นถึงผลการแลกเปลี่ยนความร้อนของใบพัด โดยมุมที่มากและระยะพัดน้อย การแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าสูง ในทางกลับกันเมื่อมุมที่น้อยและระยะพัดมาก การแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าต่ำ ซึ่งผลที่เกิดจากมุมจะมีผลมากกว่าเมื่อเทียบกับระยะพัด และสัดส่วนตัวเลขนัสเซลท์จะมีค่าลดลงตามตัวเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการพัฒนาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนชนิดใบพัดเข้าภายในท่อแลกเปลี่ยน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนจะช่วยทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและสามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เนื่องจากการไหลแบบหมุนวนจะทำให้ความหนาของชั้นขีดผิวบางลง มีผลทำให้อุ่นภูมิที่ผิวต่ำลงและความหนาแน่นของอากาศที่ผิวน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผิวของท่อเปล่า ทำให้มีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวมากขึ้น รวมทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสผิวมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเห็นได้จากใบพัดที่มีขนาดของมุม 60 องศา การหมุนวนของอากาศจะสูงกว่าแบบมุมอื่น เช่นเดียวกันระยะพัดเท่ากับ 5 จะส่งผลให้การวางระยะใบพัดดี

ขึ้น โอกาสในการสร้างการไหลหมุนวนภายในท่อก็จะมีค่ามากขึ้นกว่าระยะพิตอื่นๆ ในส่วนของความเสียดทานก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งมีผลมาจากค่าความหนืดบริเวณชั้นขีดผิวมีค่าสูง ส่งผลให้แรงต้านทานการไหลสูงตามไปด้วย

2. ผลของการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนแบบใบพัด ชนิดที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือมุม 60 ที่ระยะพิต(PR)เท่ากับ 5 ซึ่งสามารถให้ค่าถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุดจากเดิมถึง 125 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่มีความเสียดทานเพิ่มขึ้นถึง 610 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการไหลแบบท่อเปล่า

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Yildiz, Y. Bicer, D. Pehlivan, "Influence of fluid rotation on the heat transfer and pressure drop in double-pipe heat exchangers", Appl. Energy, 1996, vol. 54, pp. 49-56.
- [2] T. Bali, T. Ayhan, "Experimental investigation of propeller type swirl generator for a circular pipe flow", Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1999, vol. 26, pp. 13-21.
- [3] M. Yilmaz, O. Comakli, S. Yapici, "Enhancement of heat transfer by turbulent decaying swirl flow", Energy Convers. Mgmt., 1999, vol. 40, pp. 1365-1376.
- [4] P. Promvong, S. Eiamsa-ard, "Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator", Energy Convers. Mgmt., 2006, vol. 47, pp. 2867-2880.
- [5] Yunus A. Cengel (1998). Heat Transfer - A Practical Approach, International Ed., McGraw-Hill, United States of America.
- [6] Dittus F.W., Boelter, L.M.K. University of California at Berkley, Publications on Engineering, 2: 443, 1930.