

# คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในท่อที่มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน

## Heat Transfer and Friction Characteristics in a Tube fitted with Swirl Generator

สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด<sup>1,\*</sup> ยูทธนา พลอยฉาย<sup>2</sup> สมศักดิ์ เพ็ชรกุล<sup>1</sup> สมชาย ศรีพัฒนพิพัฒน์<sup>1</sup> พงษ์เจต พรหมวงศ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

โทร 0-2988-3661 ต่อ 241 โทรสาร 0-2988-3661 ต่อ 241 E-mail: smith@mut.ac.th

<sup>2</sup>คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี เพชรบุรี 76000

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Smith Eiamsa-ard<sup>1,\*</sup> Yuttana Ploychay<sup>2</sup> Somsak Pethkool<sup>1</sup> Somchai Sripattanapipat<sup>1</sup> Pongjet Promvongse<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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: smith@mut.ac.th

<sup>2</sup>Faculty of Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi 76000

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

### บทคัดย่อ

ในบทความฉบับนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการให้ความร้อนที่ผิววงแหวน โดยทำการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนแบบแนวสัมผัส (หอยโข่ง) ที่ทางเข้าของท่อ ซึ่งมีอากาศเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อ แลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 6500 ถึง 34000 ในการทดลองการไหลหมุนวนจะมีผลกระทบต่อชั้นขีดผิวที่บางลง เพิ่มพื้นที่สัมผัสของไหลที่ผิวท่อ และหน่วงการไหลของไหลภายในท่อให้ยาวนานยิ่งขึ้น ผลกระทบนี้มีผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงมากขึ้นขณะเดียวกันก็มีความเสียดทานที่เกิดขึ้นในท่อมากขึ้น จากผลการทดลองท่อที่มีการติดตั้งชุดหอยโข่งจะให้ผลการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อเปล่า 200-350 เปอร์เซ็นต์ และยังเห็นได้ชัดกว่าค่าถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์

**คำสำคัญ:** การถ่ายเทความร้อน, ความเสียดทาน, การไหลหมุนวน

### Abstract

In the present work, heat transfer and friction characteristics of a snail (swirl generator) used for heat transfer enhancement in heat exchangers are investigated experimentally. The snail is mounted at the entrance of the test tube which air is passed as the working fluid at Reynolds number between 6500 and 34000. There is a significant increase in Nusselt number for the heat exchanger with a snail entrance because the contact of the fluid with the tube wall is better than for the plain tube in the other hand, a snail also cause an important increase in friction. The heat transfer results showed that the Nusselt number is a function of Reynolds number and the snail was found to improve the rate of heat transfer by 200-350 per-cents over the plain tube.

**Keywords:** heat transfer, pressure drop, swirl flow

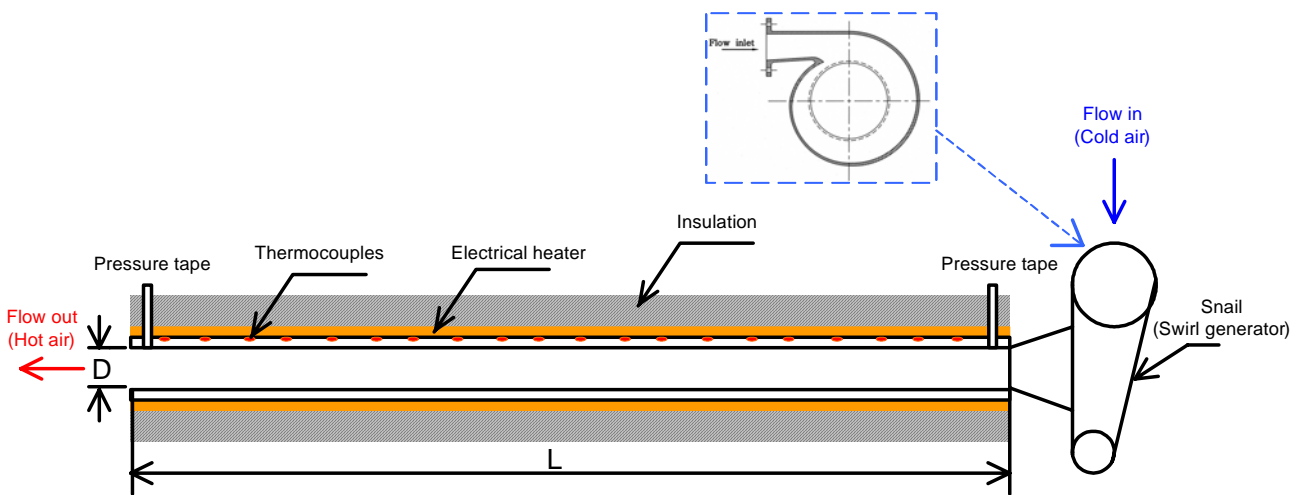
### สัญลักษณ์

$Q$	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)	$\dot{m}$	อัตราการไหลโดยมวล (kg/s)	$C_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kgK)
$T_i$	อุณหภูมิทางเข้าของท่อ (K)	$T_o$	อุณหภูมิทางออกของท่อ (K)	$T_b$	อุณหภูมิเฉลี่ย (K)
$T_w$	อุณหภูมิที่ผนังท่อ (K)	$\bar{T}_w$	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังท่อ (K)	$h$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m <sup>2</sup> K)
$k$	ค่าการนำความร้อน (W/mK)	$A$	พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m <sup>2</sup> )	$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (m)
$Nu_m$	ตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย	Re	ตัวเลขเรย์โนลด์	$\Delta P$	ความดันตกคร่อม (Pa)
$f$	ความเสียดทาน	$V$	ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ย (m/s)	$\mu$	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล (Ns/m <sup>2</sup> )
$\nu$	ความหนืดจลน์ของของไหล (m <sup>2</sup> /s)				

## 1. บทนำ

จากอดีตถึงปัจจุบันได้มีความพยายามที่หาทางลดขนาดและค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวแปรสำคัญในการลดขนาดและค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำได้โดยการทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งอยู่ในความสนใจของนักวิจัยจำนวนมากมาย โดยได้มีความพยายามในการใช้วิธีการแบบต่างๆ ในการช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนแบบบังคับ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถที่จะลดขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งช่วยทำให้เพิ่มการประหยัดพลังงานได้ โดยทั่วไปจำแนกแนวทางการ

ช่วยการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยกันสองวิธี วิธีแรกคือ แบบ Passive method ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกมากระตุ้น อันได้แก่ การใช้พื้นผิวที่ได้รับการปรับสภาพแล้ว (treated surface) การใช้พื้นผิวหยาบ (rough surface) การเพิ่มพื้นผิว (extended surface) การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (swirl flow devices) การใช้ท่อขด (wire coils) และการเติมสารลงไปของเหลวและก๊าซ สำหรับวิธีที่สองเป็นแบบ Active method ซึ่งต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอก (external power source) ได้แก่ การใช้อุปกรณ์ทางกล การทำให้เกิดการสั่นของพื้นผิว การทำให้เกิดการสั่นของของไหล การฉีดกระแทบหรือการดูดของของไหล และการฉีดกระแทบแบบเจ็ท



รูปที่ 1 ชุดท่อทดสอบที่มีการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวน

ท่อที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนเป็นอุปกรณ์ในทางปฏิบัติที่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆ โดยทั่วไปการไหลแบบหมุนวนในท่อสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง (continuous swirl flow) และการไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น (decaying swirl flow) ใน การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่องการเคลื่อนที่แบบหมุนวนจะเกิดขึ้นตลอดทั้งความยาวของท่อ ในขณะที่การไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้น การหมุนวนจะเกิดขึ้นที่ช่วงต้นท่อและจะลดการหมุนวนหรือการเสื่อมสลายลงไปเรื่อยๆ ตามแนวการไหล สำหรับการสอดใส่แผ่นบิด [1,2] ขดลวดที่ถูกติดตั้งแทรกอยู่ในท่อ [3] และการติดตั้ง helical vanes หรือ การเซาะร่องเกลียว (helical grooves) ในผิวท่อด้านในเป็นตัวทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนต่อเนื่อง ในขณะที่อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุนวนที่ทางเข้าจะทำให้เกิดการหมุนวนภายในท่อเฉพาะช่วงเริ่มต้น [4,5,6,7,8] สำหรับการไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานลดลงตามระยะทางการไหลในขณะที่การไหลแบบหมุนวนต่อเนื่องค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การเสียดทานจะมีค่าคงที่ตลอดท่อ

นับตั้งแต่ Kreith และ Margolis (1959) ได้นำเสนอหลักการที่ว่า การไหลแบบหมุนวนสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้กับท่อได้ และต่อมาก็มีการทดลองที่เกี่ยวกับคุณลักษณะความเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนในการไหลแบบหมุนวนเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งกล่าวได้ว่าความเร็วของหมุนวนที่เพิ่มขึ้นโดยมีผลทำให้ชั้นขีดผิวบางลงและเพิ่มการกระเพื่อมของการไหลแบบปั่นป่วนทั้งแนวสัมผัสและแนวรัศมีอันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสียดทานขณะที่การถ่ายเทความร้อนภายในท่อเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมสำหรับการไหลแบบหมุนวนเฉพาะช่วงเริ่มต้นได้ถูกทำการทดสอบโดย Yilmaz และคณะ [4] การเคลื่อนที่แบบหมุนวนของอากาศถูกสร้างจากเครื่องกำเนิดการไหลแบบหมุนวนแบบ radial guide vane ใบพัดของเครื่องกำเนิดได้ถูกออกแบบให้สามารถปรับความแรงของการไหลหมุนวนขนาดต่างๆ ได้ ท่อที่ใช้ในการทดสอบได้รับความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าที่พันอยู่รอบๆ ซึ่งมีการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อทำให้เกิดสภาวะ constant heat flux จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของการไหลแบบหมุนวนสูง

กว่าการไหลตามแนวแกน และจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความแรงของการหมุนวนของใบพัดที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำ

ในการทำให้ชั้นขีดผิวความร้อนบางลง สามารถจะทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลหมุนวนซึ่งนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ ในการศึกษาเพื่อหาผลของการหมุนต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อนคงที่ที่ผิวและมีการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนที่ต้นท่อดังรูปที่ 1 โดยการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนที่ทางเข้าทำให้ส่งผลโดยตรงต่อบริเวณผิวท่อดังในซึ่งมีความต้านทานความร้อนสูงเพื่อทำการลดค่าความหนืดและทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

## 2. ทฤษฎีในการวิเคราะห์

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อและค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยสามารถหาได้ดังนี้ โดยค่าความร้อนที่ได้รับจากของไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์ใดๆ คือ

$$Q_{air} = Q_{convection} \quad (1)$$

$$Q_{air} = \dot{m}C_{p,a}(T_o - T_i) = VI \quad (2)$$

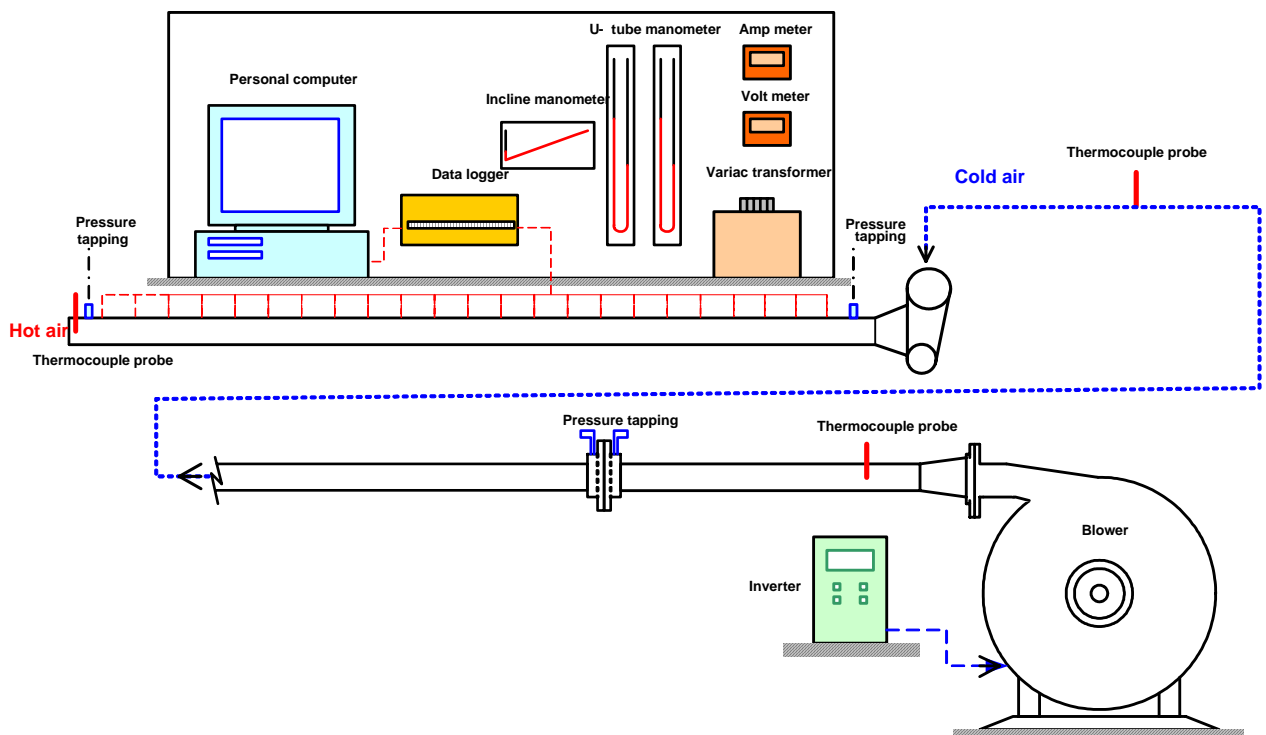
โดยค่าการพาความร้อนที่ผิวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_{convection} = hA(\tilde{T}_w - T_b) \quad (3)$$

เมื่อ

$$T_b = (T_o + T_i) / 2 \quad (4)$$

และ



รูปที่ 2 ชุดทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อที่มีการติดตั้งชุดสร้างการไหลวน

$$\tilde{T}_w = \sum T_w / 15 \quad (5)$$

เมื่อ  $T_w$  เป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวของท่อใน (local wall temperature of the tube) โดย  $T_w$  จะทำการวัดที่ผิวนอกของของท่อใน และทำการวัดลึกลงไปที่ผิว 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งไม่คิดผลกระทบความต้านทานความร้อนที่ผิวท่อ โดยทำการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยจากทางเข้าถึงทางออกด้วยกัน 4 จุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (average inside heat transfer coefficient) และ ค่าตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ย สามารถหาได้สมการที่ (2) และ (3) ดังนี้

$$h = \dot{m}C_{p,a}(T_o - T_i) / A(\tilde{T}_w - T_b) \quad (6)$$

$$Nu_m = hD / k \quad (7)$$

สำหรับของไหลที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์หาได้จาก

$$Re = VD / \nu \quad (8)$$

และค่าความเสียดทานหาได้จาก

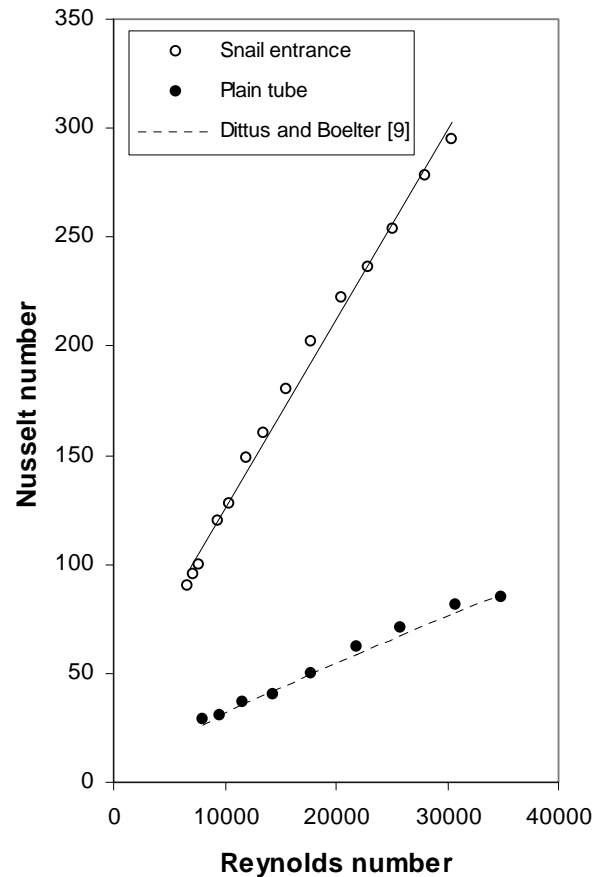
$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right)\left(\rho \frac{U^2}{2}\right)} \quad (9)$$

### 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

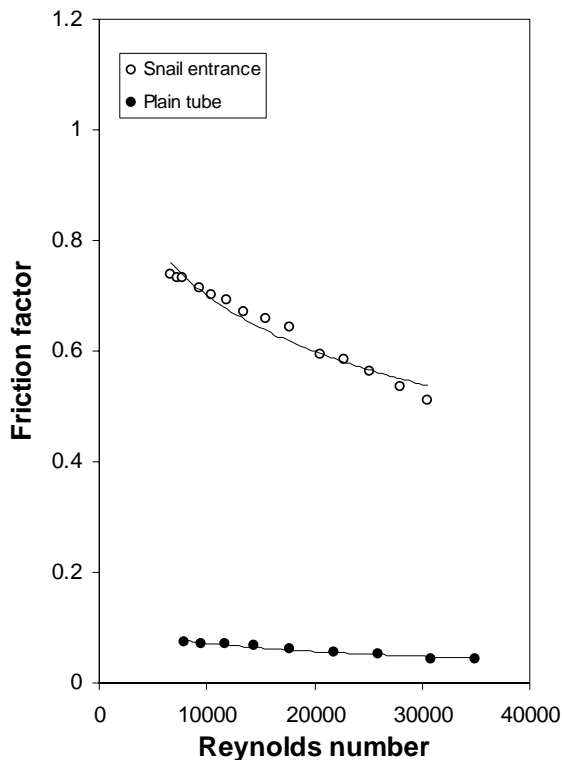
ชุดอุปกรณ์การทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนได้ถูกแสดงดังรูปที่ 2 ในการทดลองอากาศในสภาวะบรรยากาศไหลผ่านท่อที่มีการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อนที่ผิววงที่ซึ่งทำมาจากท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 47 มิลลิเมตร มีความยาว 1250 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งท่อทดสอบจะทำการหุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนแก่ภายนอกให้น้อยที่สุดและทำการป้องกันการรั่วซึมความร้อนของระบบโดย variac จะเป็นตัวควบคุมกระแสที่ขดลวดความร้อน ในการทดลองการไหลหมุนวนจะถูกสร้างโดยการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนแบบหอยโข่ง สำหรับอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า ทางออก และอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่อจะถูกทำการตรวจวัดโดยเทอร์โมคัพเพิลแบบเค ซึ่งอุณหภูมิทั้งหมดที่ทำการวัดจะถูกต่อเข้ากับชุดเก็บข้อมูล อากาศจากพัดลมจะถูกวัดค่าอัตราการไหลโดยใช้ออร์ฟิสมิเตอร์และปรับค่าอัตราการไหลโดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมพัดลม (Blower 3 hp) จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ทางเข้าและออกของท่อจะถูกทำการติดตั้งจุดวัดความดันสำหรับหาค่าความดันตกคร่อมในท่อโดยต่อเข้ากับมานอมิเตอร์สำหรับอ่านค่าผลต่างความสูง ในการทดสอบแต่ละครั้งจะทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ อัตราการไหลและความดันตกคร่อมของอากาศภายหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ในระหว่างการทดลองจะทำการปรับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ทางเข้าท่ออยู่ระหว่าง 6500 และ 34000 โดยคุณสมบัติต่าง ๆ ของไหลและการหาค่าตัวเลขนี้สเซลท์จะถูกพิจารณาจากค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยจากสมการที่ 4

### 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

วัตถุประสงค์ที่สำคัญที่สุดในการศึกษานี้คือการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มโดยอาศัยหลักการของการไหลแบบหมุนวน ซึ่งผลการทดลองที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกรณีท่อเปล่าและค่าจากความสัมพันธ์ Dittus และ Boelter [9] ซึ่งเป็นสมการสำหรับการไหลตามแนวแกนหรือในท่อเปล่า ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลท์และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวน จากรูปที่ 3 การถ่ายเทความร้อนหรือตัวเลขนัสเซลท์ของท่อเปล่าจะมีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ Dittus และ Boelter [9] โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ท่อที่มีการติดตั้งชุดสร้างการไหลหมุนวนจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นถึง 350 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่าถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 360 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่าโดยจะเห็นได้ว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุมาจากความแรงของการไหลหมุนวนที่มากขึ้น (stronger swirling flow) ซึ่งความเร็วของการไหลหมุนวนที่เพิ่มทำให้ชั้นขีดผิวบางลงและเพิ่มการกระเพื่อมของการไหลแบบปั่นป่วนทั้งแนวสัมผัสและแนวรัศมี ซึ่งในการไหลแบบนี้เป็นการลดความหนาของชั้นขีดผิว, เพิ่มความเร็วโดยรวมและหน่วงเวลาในการไหลวนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน อันเป็นสาเหตุที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนภายในท่อเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวน

ในรูปที่ 4 เป็นการแสดงความเสียดทานของท่อชั้นในตามตัวเลขเรย์โนลด์ โดยความเสียดทานมีแนวโน้มคล้ายกันสำหรับการไหลแบบหมุนวนและตามแกน (ท่อเปล่า) และจะเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่เพิ่มขึ้น และ จะเห็นได้อีกว่าความเสียดทานของท่อที่มีการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับท่อเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากความดันไดนามิกสของอากาศร้อนมีค่าลดลงเนื่องจากความหนืดของของไหลบริเวณผนังท่อที่มีค่าสูงมากและมีแรงกระทำที่เกิดจากการหมุนวนยิ่งไปกว่านั้นความเสียดทานที่เพิ่มขึ้นมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากผลของแรงดันกับแรงเฉื่อยในชั้นขีตผิว โดยมีความเสียดทานเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1070 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

## 5. สรุป

จากผลการทดลองการพัฒนาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนที่ทางเข้าท่อสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนจะช่วยทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและสามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เนื่องจากการไหลแบบหมุนวนจะทำให้

ความหนาของชั้นขีตผิวบางลง มีพื้นที่สัมผัสผิวมากขึ้น และ มีการหมุนงการไหลภายในท่อให้ยาวนานยิ่งขึ้น ขณะเดียวกันความเสียดทานจะมากขึ้นเช่นเดียวกัน

- 2) ผลของการติดตั้งชุดกำเนิดการไหลหมุนวนแบบแนวสัมผัสสามารถให้ค่าถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 350 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่มีความเสียดทานเพิ่มขึ้นถึง 1070 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการไหลตามแนวแกนหรือท่อเปล่า

## เอกสารอ้างอิง

1. Manglik R.M., and Bergles, A.E. "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted-Tape Inserts in isothermal Tubes: Part II-Transition and Turbulent Flows," in: Enhanced Heat Transfer, M.B.Pate and M.K.Jensen, eds., ASME HTD, Vol. 202, pp. 99-106, 1992.
2. Webb, R.L. "Principles of Enhanced Heat Transfer," Wiley, New York, 1994.
3. Sethumadhavan R., and Rao, M.R. "Turbulent Flow Heat Transfer and Fluid Friction in Helical-Wire-Coil-Inserted Tubes," Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 12, pp. 1833-1845, 1983.
4. Yilmaz, M., Comakli O., and Yapici, S., "Enhancement of heat transfer by turbulent decaying swirl flow," Energy Convers. Mgmt., Vol. 40, pp. 1365-1376, 1999.
5. Tung, V.X., Dhir, V.K., Chang, F., Karagozian A.R., and Zhou, F. "Enhancement of Forced Convection Heat Transfer in Tubes Using Staged Tangential Flow Injection," Annual Report, June 1987-Sept. 1988, GRI report No.GRI-89/020, 1989.
6. Dhir, V.K., Chang F., and Yu, J. "Enhancement of Single Phase Forced Convection Heat Transfer in Tubes Using Staged Tangential Flow Injection," Final Report, June 1987-Dec.1989, GRI report No. GRI-90/0134, 1990.
7. Dhir V.K., and Chang, F. "Heat Transfer Enhancement Using Tangential Injection, ASHRAE Transactions," Vol. 98, BA-92-4-1, 1992.
8. Son D., and Dhir, V.K., "Enhancement of Heat Transfer in an Annuals Using Tangential Flow Injection, in: Heat Transfer in Turbulent Flows," ASME HTD, Vol. 246, 1993.
9. Dittus F.W., and Boelter, L.M.K. University of California at Berkley, Publications on Engineering, 2: 443, 1930.