

Received: August 30, 2022; Revised: September 22, 2022; Accepted: September 28, 2022

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยใช้แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววี Heat transfer augmentation in a circular tube using V-wavy twisted tape

นุรัตน์ ดอกไม้¹ สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด² ปรัชญา มุขดา¹ และขวัญชัย หนาแน่น^{1*}
Nurat Dokmai¹, Smith Eiamsa-ard², Prachya Mukda¹ and Kwanchai Nanan^{1*}

^{1*}คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดกรุงเทพฯ

*Corresponding Author E-mail Address : ae_bew@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมที่สอดใส่แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววี (V-WTT) แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีทำจากแผ่นอลูมิเนียมมีความหนา 1.0 มิลลิเมตร กว้าง 37.5 มิลลิเมตร ถูกนำมาบิดที่อัตราส่วนการบิด (y/W) คงที่เท่ากับ 3.0 และมุมของแผ่นบิดผิวคลื่นรูปตัววี (θ) ที่ 30° and 60° ตามลำดับ ท่อทดสอบทำจากทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 38 มิลลิเมตร ยาว 1,600 มิลลิเมตร อากาศถูกใช้เป็นของไหลในการทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ส (Re) ระหว่าง 4000 ถึง 8000 ภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบพลักซ์ความร้อนคงตัว ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ เลขนัสเซิลท์ ตัวประกอบเสียดทาน และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน ผลการวิจัยพบว่าท่อทดสอบที่สอดใส่แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววี (θ) 30° ที่ Re เท่ากับ 4,000 ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 1.24

คำสำคัญ: ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววี การเพิ่มถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน

Abstract

This research studied heat transfer performance in circular tubes installed with V-wavy twisted tape (V-WTT). The V-wavy twisted tape was made of a thin straight aluminum sheet 1.0 millimeter thick, a width of 37.5 millimeter, constant twist ratio (y/W) of 3.0 and V-wavy angles (θ) of 30° and 60° , Respectively. The test tube was a copper having an internal diameter of 38 millimeter and a length of 1,600 millimeter. Air was used as a working fluid for Reynolds numbers (Re) ranging from 4,000 to 8,000 under uniform wall heat-flux condition. The heat transfer, friction loss and thermal performance behaviors were determined. The experimental results showed that the test tube with the V-wavy twisted tape having (θ) of 30° at Re of 4,000 gave the maximum heat transfer performance of 1.24.

Keywords: Heat exchanger tube, V-wavy twisted tape, Heat transfer enhancement, Friction factor

บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกนำมาใช้ในหลายอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็น โรงจักรต้นกำลัง อุตสาหกรรมปรับอากาศและการทำความเย็น อุตสาหกรรมรถยนต์ เตาปฏิกรณ์เคมี หรืออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การลดต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมเหล่านี้สามารถทำได้โดยลดการใช้พลังงานด้วยการลดขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพในการทำงานให้มากขึ้น มีการซ่อมและการบำรุงรักษาน้อย อุปกรณ์ประกอบราคาถูกและง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้เทคนิคแบบพาสซีฟ (Passive technique) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องนำพลังงานจากภายนอกมาใช้ แต่ทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวหรือโครงสร้าง ประกอบด้วย การทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ ผิวท่อเป็นเกลียวและอุปกรณ์ที่เกิดการไหลหมุนควง หรืออุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulators) ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งของวิธีพาสซีฟเนื่องจากการเป็นสอติสอุปกรณ์เข้าไปในช่องทางการไหลประกอบไปด้วย ขดลวด (Wire coil) แหวนแบบกรวย (Conical ring) แผ่นใบบิด (Twisted tape) ปีก (Winglet) เช่น Eiamsa-ard and Promvongse (2005) ศึกษาเชิงทดลองอิทธิพลของแผ่นใบบิดแบบเกลียวต่อการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนโดยติดตั้งแผ่นใบบิดแบบเกลียว 3 รูปแบบ คือ แผ่นใบบิดเต็มช่วงแบบมีแกน แผ่นใบบิดแบบทั่วไป (ไม่มีแกน) และแผ่นใบบิดตัวเว้นช่วง พบว่าแผ่นบิดเต็มช่วงแบบมีแกนจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 160 เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ สำหรับการใส่แผ่นบิดเต็มช่วงและแผ่นบิดแบบเว้นช่วงที่ระยะช่องว่างเท่ากับ 0.5 มีค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 150 และร้อยละ 145 เมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบ ต่อมา Sarada et al. (2010) ศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนด้วยแผ่นใบบิดในท่อกลมแนวตั้ง ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 6,000 ถึง 13,500 โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนแบบปลั๊กความร้อนคงที่ ท่อทดสอบมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 27.5 mm. แผ่นใบบิดความกว้างเท่ากับ 10, 14, 18, 22 และ 26 mm. อัตราส่วนกาบิดเท่ากับ 3, 4 และ 5 พบว่าการติดตั้งแผ่นบิดช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับท่อผิวเรียบได้ถึงร้อยละ 36-48 และร้อยละ 33-39 สำหรับความกว้างแผ่นใบบิดที่ 26 และ 22 mm. ตามลำดับ (Eiamsa-ard et al., 2011) ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานในท่อกลมโดยใช้แผ่นใบบิดปีกสี่เหลี่ยม (TT-RWs) มี 2 แบบ คือ แบบทั่วไป (TT) และแบบปรับแกน (TA) อัตราส่วนความลึกปีก (d/W) ค่าระหว่าง 0.1 ถึง 0.3 อัตราส่วนการบิด (y/W) = 4.0 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,500 ถึง 20,200 โดยใช้ น้ำ เป็นของไหลทดสอบ ผลการทดลองพบว่าการใช้แผ่นบิดแบบปีกสี่เหลี่ยมที่ $d/W = 0.3$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์สูงกว่าท่อผิวเรียบประมาณร้อยละ 100 และมีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.36 ถัดมา (Bhuiya และคณะ, 2013) ศึกษาเชิงทดลองการใช้แผ่นบิดแบบเจาะรูที่ความพรุนเท่ากับร้อยละ 1.6, 4.5, 8.9 และ 14.7 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 7,200 ถึง 49,800 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ พบว่าการใช้แผ่นบิดแบบเจาะรูให้ค่าเลขนัสเซิลต์ตัวประกอบความเสียดทานและสมรรถนะทางความร้อนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบคิดเป็นร้อยละ 110-340, 110-360 และ 28-59 ตามลำดับ และ (Eiamsa-ard et al., 2012) ศึกษาถึงวิธีเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นใบบิดแบบเกลียว (Helically Twisted Tapes : HTTs) โดยใช้แผ่นใบบิดแบบเกลียวทำมาจากแผ่นใบบิดทั่วไปนำมาบิดให้เป็นรูปเกลียวที่อัตราการบิด (y/W) เท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 อัตราส่วนพิตช์ของเกลียว (p/D) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 6,000 ถึง 20,000 พบว่าการใช้แผ่นใบบิดแบบเกลียวให้ค่าเลขนัสเซิลต์และตัวประกอบความเสียดทานน้อยกว่าแผ่นแบบเกลียว (Conventional Helical Tape, CHT) แต่ให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบิดและอัตราส่วนพิตช์เกลียว แต่สมรรถนะทางความร้อนจะมีลักษณะตรงกันข้าม ถัดมา (Dhamane et al., 2014) ศึกษาผลของแผ่นใบบิดหยักโดยพิจารณาที่อัตราส่วนพิตช์ = 8.33, 9.79 และ 10.42 ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4,000 ถึง 9,500 พบว่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มีการใส่แผ่นบิดหยักสูงถึง 1.40 ที่อัตราส่วนบิด 8.33 และร้อยละ 1.45 ที่อัตราส่วนบิด 10.42 จากนั้น (Langeroudi and Javaherdeh, 2018) ได้ใช้ท่อลูกฟูกร่วมกับแผ่นบิดแบบตัดตัววีที่มีอัตราส่วนบิด อัตราส่วนความลึก และอัตราส่วนความ

กว้างต่างกัน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนของท่อลูกฟูกที่สอดด้วยแผ่นบิตแบบตัดตัววีนั้นสูงกว่ากรณีแผ่นบิตแบบ ล่าสุด (Dagdevir et al., 2021) ได้ปรับปรุงแผ่นบิตแบบมีรูพรุน (PTTE) และแบบรอยบุ่ม (DTTE) ที่ขอบของแผ่นบิตซึ่งมีอัตราส่วนระยะพิทซ์ 0.25, 0.5 และ 1.0 พบว่า DTTE ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า PTTE ในขณะที่ PTTE ให้ค่าความดันตกคร่อมน้อยกว่ากรณี DTTE นอกจากนี้ยังพบว่ากรณี DTTE ที่มี $p/y = 0.25$ ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดที่ 1.57 ที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำสุดที่ 6367 จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่ได้ปรับปรุงแผ่นบิตแบบผิวคลื่นรูปตัววีที่สามารถสร้างความปั่นป่วนและทำลายชั้นขีดผิวความร้อนใกล้กับผนังท่อส่งผลให้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นได้

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ทฤษฎีในการวิเคราะห์

ในการทดลองการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อน เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย ตัวประกอบความเสียดทาน และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบถูกพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิเฉลี่ยตามสมการที่ (4) ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยที่ Q_{air} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนอากาศ (W)
 Q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (W)

$$Q_{air} = mC_p(T_o - T_i) = VI \quad (2)$$

โดยที่ m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
 C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg K)
 T_i คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าท่อทดสอบ ($^{\circ}C$)
 T_o คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางออกท่อทดสอบ ($^{\circ}C$)
 V คือ แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

ในการทดลองสมดุลทางความร้อนของระบบมีค่าการสูญเสียไม่เกิน 5% เพื่อใช้หาค่าการพาความร้อนที่ผิวดังสมการ

$$Q_{conv} = hA(\bar{T}_w - T_b) \quad (3)$$

เมื่อ

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

และ

$$\bar{T}_w = \sum T_w/10 \quad (5)$$

โดยที่	h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ ($\text{W/m}^2 \text{K}$)
	A	คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน (m^2)
	\bar{T}_w	คือ อุณหภูมิที่ผิวท่อเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)
	T_b	คือ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และเลขนัสเซลท์เฉลี่ย สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$Nu = hD/k \quad (6)$$

$$h = \dot{m}C_p(T_o - T_i)/hA(\bar{T}_w - T_b) \quad (7)$$

โดยที่	Nu	คือ เลขนัสเซลท์
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
	k	คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ (W/m K)

และค่าตัวประกอบความเสียดทานหาได้จาก

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

โดยที่	f	คือ ตัวประกอบความเสียดทาน
	ΔP	คือ ความดันตกคร่อมของอากาศที่ท่อทดสอบ (N/m^2)
	U	คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ (m/s)
	L	คือ ความยาวท่อทดสอบ (m)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

สำหรับค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่พิจารณาภายใต้กำลังขับของไหลเดียวกัน สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{(Nu/Nu_p)}{(f/f_p)^{1/3}} \quad (9)$$

โดยที่	η	คือ สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (-)
	Nu_p	คือ เลขนัสเซลท์ในกรณีท่อเปล่า
	f_p	คือ ตัวประกอบความเสียดทานในกรณีท่อเปล่า

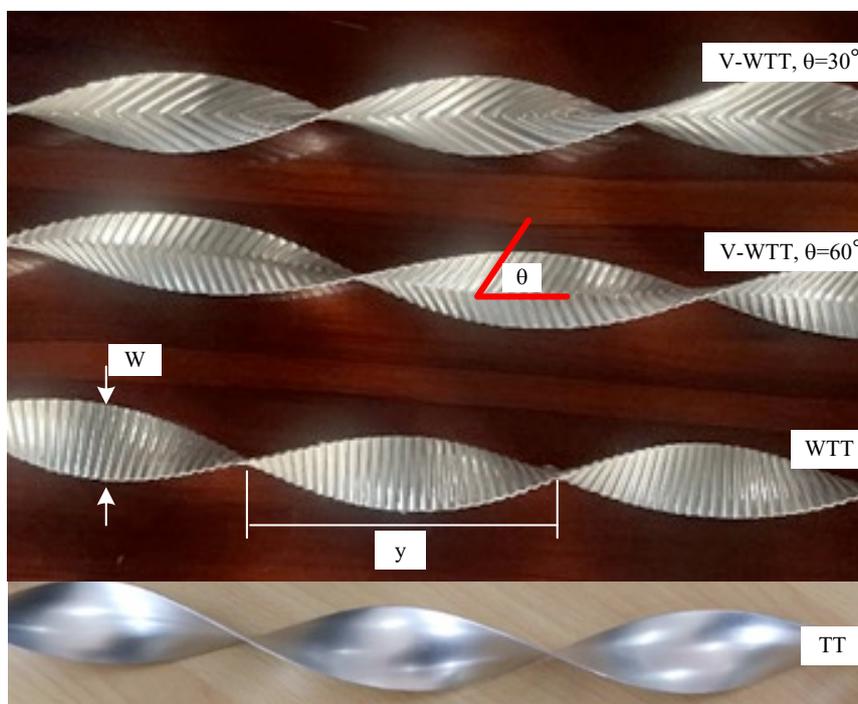
สำหรับการไหลของไหลในท่อทดลอง เลขเรย์โนลด์ส์หาได้จาก

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (10)$$

โดยที่	Re	คือ เลขเรย์โนลด์ส์
	μ	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Pa s)

อุปกรณ์การทดลอง

แผ่นบีดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีทำจากแผ่นอลูมิเนียมกว้าง (W) 37.5 มิลลิเมตร ขนาดความยาว (L) 1,600 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ถูกรีดขึ้นรูปเป็นผิวคลื่นขนาด 3 มิลลิเมตร โดยทำมุมเอียง (θ) ตามแนวยาวของแผ่นบีดเท่ากับ 30 และ 60 องศา โดยนำมาบีดให้มีอัตราส่วนการบีด (y/W) คงที่เท่ากับ 3.0 ดังแสดงในรูปที่ 1 ถูกติดตั้งในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 38 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร และยาว 1,600 มิลลิเมตร โดยผนังท่อทดสอบถูกพันด้วยขดลวดความร้อนและมีการให้ความร้อนที่ผนังท่อแบบคงตัว (Uniform Heat Flux, UHF) โดยมี Variac transformer เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า ภายนอกท่อถูกหุ้มด้วยใยแก้วเป็นฉนวนกันความร้อน ใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ อัตราการไหลสูงสุดที่ 318 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ที่ถูกควบคุมความเร็วรอบจาก Inverter ทำให้อากาศไหลเข้าท่อทดสอบมีพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลด์ (Re) ระหว่าง 4,000 ถึง 8,000 ซึ่งสามารถวัดค่าความเร็วของอากาศได้จาก Flow meter ที่ต่อกับชุดท่อ Pitot tube และที่ทางเข้าและทางออกท่อทดสอบได้ติดตั้งหัววัดผลต่างความดัน (Differential pressure) แบบดิจิทัล สำหรับการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type J วัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า 1 จุด ทางออกของท่อทดสอบ 5 จุด และที่ผิวท่อทดสอบเฉลี่ยตลอดความยาวท่อทั้งหมด 10 จุด โดยต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อน (Nu) ตัวประกอบความเสียดทาน (f) และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (η)

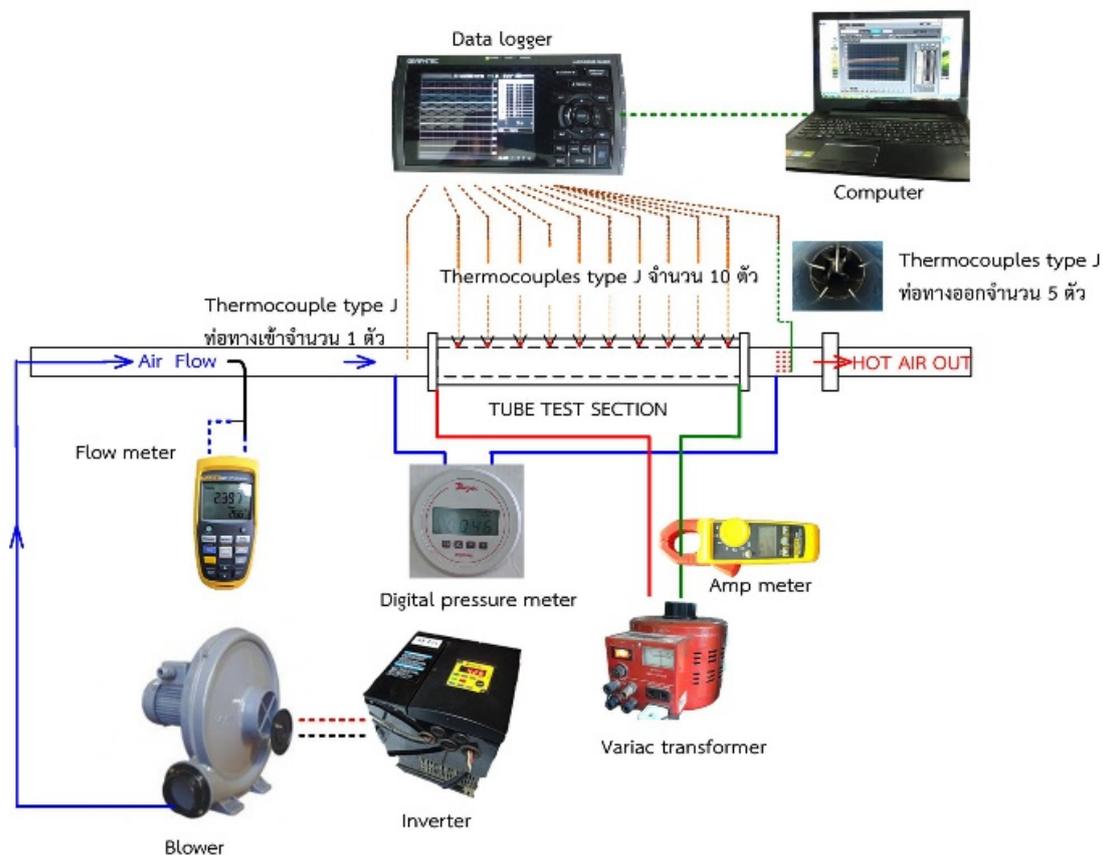


รูปที่ 1 แผ่นบีดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีทำมุม 30 องศา และ 60 องศา

โดยที่	W	คือ ความกว้างแผ่นบีด (m)
	y	คือ ระยะการบีด (m)
	V-WTT	คือ แผ่นบีดพื้นผิวคลื่นรูปตัววี
	WTT	คือ แผ่นบีดพื้นผิวคลื่น
	TT	คือ แผ่นบีดแบบปกติ

วิธีการทดลอง

ชุดทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นปิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีถูกแสดงรายละเอียดดังในรูปที่ 2 ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นจากใช้ Inverter ในการควบคุมความเร็วรอบของ Blower ให้ได้เลขเรย์โนลด์ส์เริ่มต้นเท่ากับ 4,000 ทำได้โดยวัดค่าความเร็วจาก Flow meter ที่ต่อกับชุดท่อ Pitot อากาศที่อุณหภูมิห้องจะไหลเข้าท่อทดสอบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังท่อ ที่มีการให้ความร้อนจากการจ่ายไฟฟ้าเข้าขดลวดความร้อนที่ถูกควบคุมโดย Variac transformer เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับท่อทดสอบโดยปรับค่ากำลังไฟฟ้าให้แก่ชุดให้ความร้อนที่ 65 วัตต์ รอให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าอุณหภูมิเริ่มคงที่จึ้นบันทึกค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้า ทางออกและอุณหภูมิผิวท่อทดสอบเพื่อนำไปหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่ถูกนำเสนอในรูปของตัวเลขนัสเซลท์ (Nu) สำหรับผลต่างความดันตกคร่อม (ΔP) ของอากาศที่ท่อทดสอบวัดจาก Digital pressure meter ซึ่งจะถูกนำไปหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน (f) และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (η) ในลำดับถัดไป



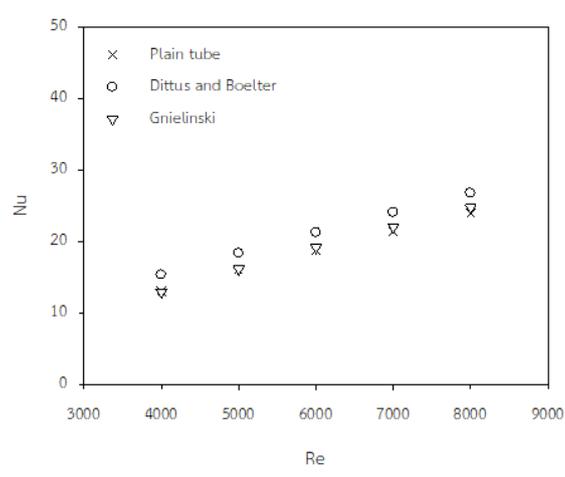
รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการใช้แผ่นปิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววี

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

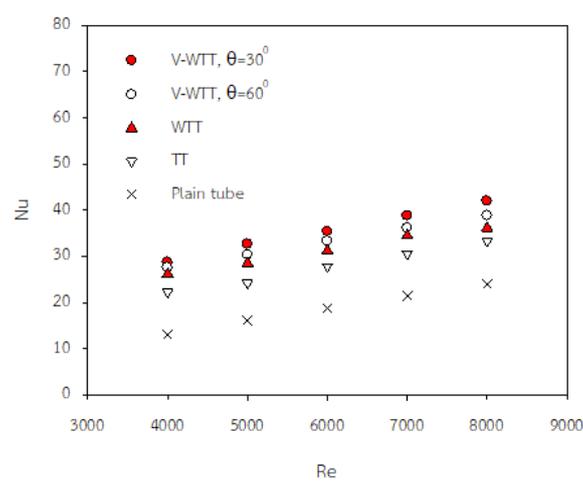
การถ่ายเทความร้อน (Nu)

จากรูปที่ 3 แสดงผลของค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการทดลองในกรณีท่อเปล่าซึ่งถูกนำไปสอบเทียบความน่าเชื่อถือกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ของนักวิจัยในอดีต เช่น Dittus and Boelter (1930), Gnielinski (1976) พบว่าเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทดลองในกรณีท่อเปล่า (Plain tube) มีแนวโน้มเดียวกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์และมี

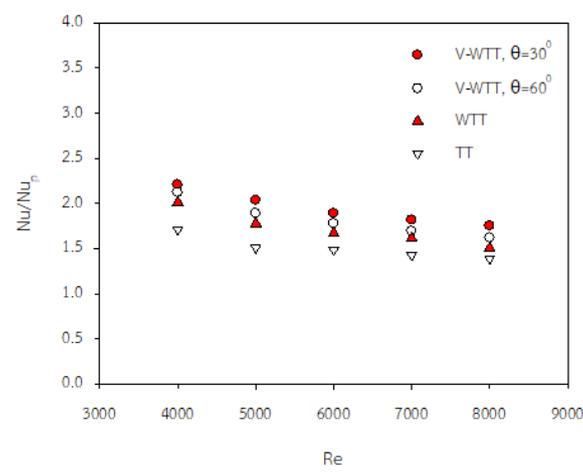
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 14 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์สในกรณีท่อเปล่าเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ในอดีต



(ก) เลขนัสเซลท์



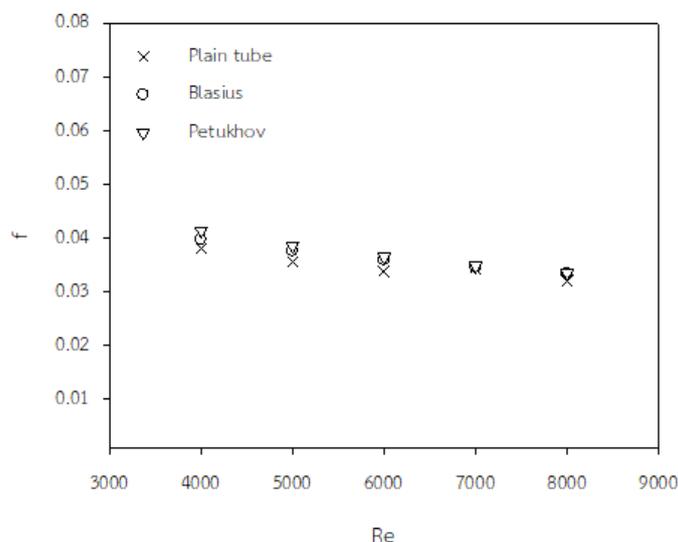
(ข) อัตราส่วนเลขนัสเซลท์

รูปที่ 4 อิทธิพลของแผ่นปิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ส

สำหรับรูปที่ 4 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์ (แกนตั้ง) กับเลขเรย์โนลด์ส์ (แกนนอน) ในขณะที่รูปที่ 4 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์ของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใส่สอดใส่แผ่นบิดแบบพื้นผิวคลื่นรูปตัววี แผ่นบิดแบบพื้นผิวคลื่น และแผ่นบิดแบบปกติ โดยมีอัตราส่วนการบิด (y/W) คงที่เท่ากับ 3.0 โดยผลการวิจัยนี้ได้นั้นศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงแผ่นบิดผิวคลื่นรูปตัววีที่ทำมุม 30° และ 60° ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้นำเสนอในรูปของเลขนัสเซลท์จะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ส์ในทุกกรณี ในขณะที่ผลของการสอดใส่แผ่นบิดสร้างการไหลหมุนวนสามารถช่วยให้เลขนัสเซลท์เพิ่มสูงขึ้นจากกรณีท่อเปล่าได้เป็นอย่างดีเนื่องจากเกิดการไหลหมุนวนส่งผลให้การแยกตัวของชั้นของไหลที่อยู่บริเวณกลางท่อเกิดการคลุกเคล้ากับของไหลที่ใกล้กับผนังท่อซึ่งเป็นบริเวณที่ของไหลมีอุณหภูมิส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ผลของการปรับปรุงแผ่นบิดผิวคลื่นรูปตัววีจะก่อให้เกิดกระแสการไหลหมุนวนของของไหลในท่อโดยมีทิศทางพุ่งชนเข้าหาผนังท่อและทำลายชั้นขีดผิวทางความร้อนให้บางลงจึงสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นบิดผิวคลื่น สำหรับอิทธิพลของมุมตัววี 30° และ 60° พบว่าที่มุมของตัววี 30° จะก่อให้เกิดทิศทางการไหลของของไหลพุ่งชนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่ามุมของตัววี 60° โดยแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่ทำมุม 30° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดโดยสูงกว่ากรณีแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่ทำมุม 60° แผ่นบิดพื้นผิวคลื่น แผ่นบิดแบบปกติ และกรณีท่อเปล่าประมาณ 6.7, 13.3, 29 และ 121 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

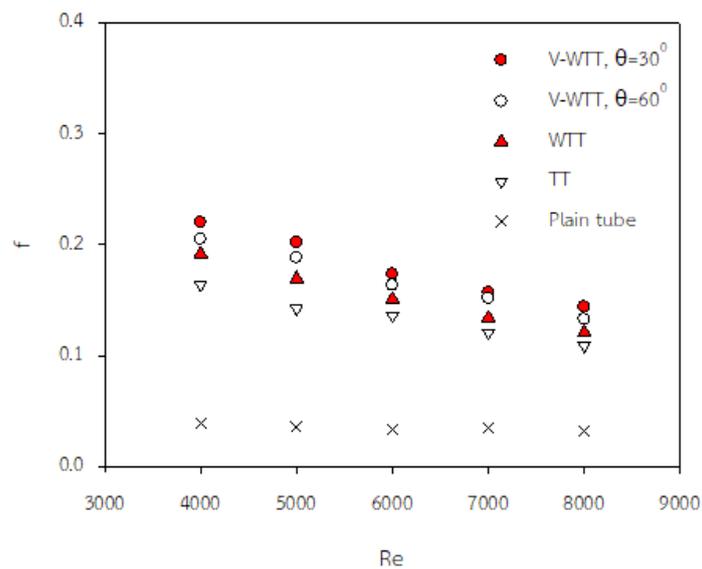
ตัวประกอบความเสียดทาน (f)

ขณะที่ตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการทดลองสำหรับกรณีการไหลในท่อเปล่า (Plain tube) ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ของนักวิจัยในอดีตเช่น Blasius (1908), Petukhov (1970) พบว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการทดลองในกรณีท่อเปล่ามีแนวโน้มเดียวกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียง 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสามารถยืนยันความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้จากการทดลองได้ ดังแสดงในรูปที่ 5

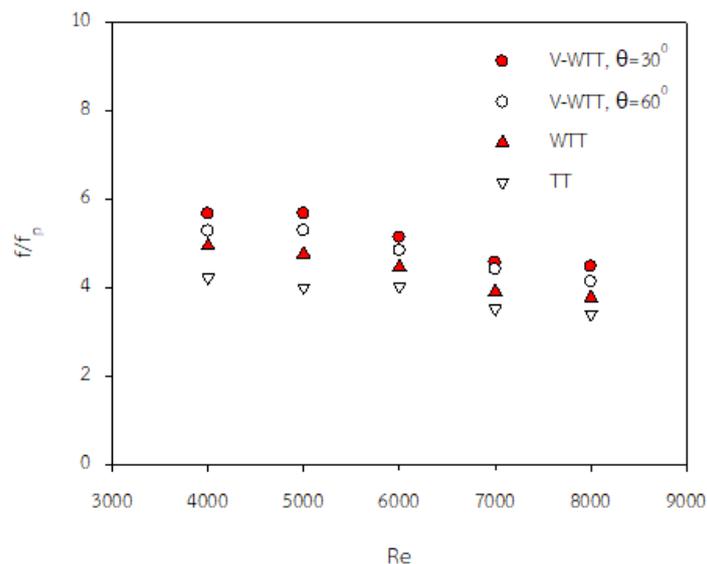


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ ในกรณีท่อเปล่าเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ในอดีต

สำหรับผลของการติดตั้งแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทานพบว่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งจากกรณีแผ่นบิดผิวคลื่น กรณีแผ่นบิดแบบปกติ และกรณีท่อเปล่า อันเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างการไหลหมุนควงที่มีทิศทางพุ่งเข้าชนผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนตามมุมเอียงของแผ่นบิดผิวคลื่นรูปตัววี โดยผลจากการทดลองพบว่าแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มุม 30° มีตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่ากรณีแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มุม 60° แผ่นบิดพื้นผิวคลื่น และแผ่นบิดแบบปกติ ประมาณ 6.5, 6.9 และ 33.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีท่อเปล่าพบว่าการสอดใส่แผ่นบิดแบบพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มุม 30° แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มุม 60° แผ่นบิดพื้นผิวคลื่น และแผ่นบิดแบบปกติจะให้ตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นประมาณ 5.1, 4.8, 4.4 และ 3.8 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) ตามลำดับ



(ก) ตัวประกอบความเสียดทาน

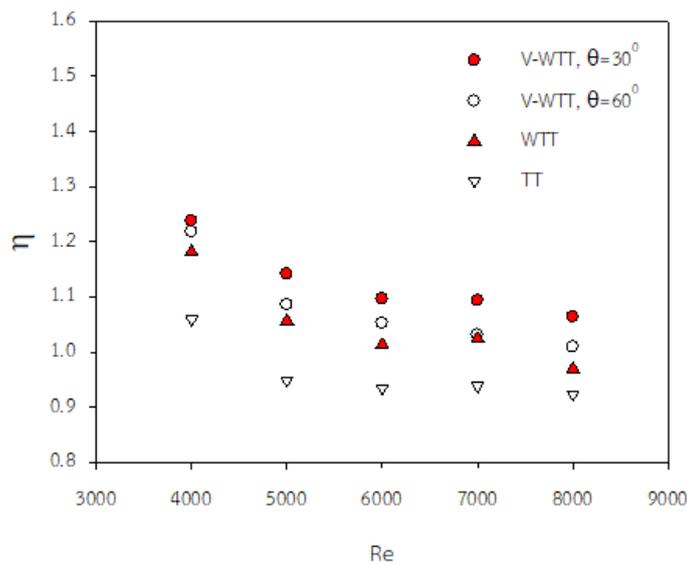


(ข) อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทาน

รูปที่ 6 อิทธิพลของแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์

สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (η)

ผลจากการศึกษาอิทธิพลของการสอดใส่แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่าสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นได้ ในขณะที่เดียวกันก็ส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียหายเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน หัวข้อนี้จึงได้พิจารณาถึงสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายใต้กำลังขับของไหลเดียวกันตามสมการที่ (9) พบว่า สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของกรณีแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีทั้งจากกรณีมุม 30° และ 60° องศา มีค่าสูงกว่ากรณีแผ่นบิดแบบผิวคลื่นประมาณ 7.5 และ 2.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และยิ่งสูงกว่ากรณีแผ่นบิดแบบปกติถึง 17.2 และ 12.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมดพบว่ากรณีแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีมุม 30° มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.24 ที่เลขเรย์โนลด์ส์ (Re) เท่ากับ 4,000 ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 อิทธิพลของแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มีผลต่อสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส์

บทสรุป

ผลของการปรับปรุงกลไกการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการสอดใส่แผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มุม 30° และ 60° พบว่าก่อให้เกิดกระแสการไหลหมุนวนของของไหลในท่อที่มีทิศทางพุ่งชนเข้าหาผนังท่อและทำลายชั้นขีดผิวทางความร้อนให้บางลงส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีแผ่นบิดพื้นผิวคลื่น แผ่นบิดแบบปกติ และจากกรณีท่อเปล่า โดยแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มุม 30° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดโดยสูงกว่ากรณีแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่มุม 60° แผ่นบิดพื้นผิวคลื่น แผ่นบิดแบบปกติ และกรณีท่อเปล่าประมาณ 6.7, 13.3, 29 และ 121 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ผลของการปรับปรุงกลไกการไหลดังกล่าวยังก่อให้เกิดค่าความเสียหายเพิ่มตามมาด้วย ซึ่งต้องพิจารณาความคุ้มค่าในเทอมของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายใต้กำลังขับของไหลเดียวกันพบว่ากรณีแผ่นบิดพื้นผิวคลื่นรูปตัววีมุม 30° มีค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 1.24 ที่เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 4,000

เอกสารอ้างอิง

- Bhuiya M.M.K., Chowdhury M.S.U., Saha M. and Islam M.T. (2013). Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications Heat and Mass Transfer*. 46: 49-57.
- Blasius H.Z. (1908). *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik* (English: *Journal of Applied Mathematics and Physics*). 56: 1- 37.
- Chang S.W., Jan Y.J. and Liou J.S. (2007). Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences*. 46: 506-518.
- Dittus F.W. and Boelter L.M.K. (1930). Heat transfer in automobile radiators of tabular type. *University of California*. 470(2): 459.
- Dhamane N.B., Nalawade D.B. and Dange M.M.P. (2014). Experimental Study of Heat Transfer for Wavy Twisted Tape Insert of Various Pitches Placed in a Circular Tube. *International Journal of Innovative Research & Development*. 142-146.
- Dagdevir T., Uyanik M. and Ozceyhan V. (2021). The experimental thermal and hydraulic performance analyses for the location of perforations and dimples on the twisted tapes in twisted tape inserted tube. *International Journal of Thermal Sciences*. 167: 107033.
- Eiamsa-ard S. and Promvong P. (2005). Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy*. 78: 483-494.
- Eiamsa-ard P., Thianpong C. and Eiamsa-ard S. (2011). Influences of Twisted-Tape with Parallel Rectangular-Wing on Thermal Performance of a Heat Exchanger. *International Conference and Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE)*. 28-30.
- Eiamsa-ard S., Yongsiri K., Nanan K. and Thianpong C. (2012). Heat transfer augmentation by helically twisted tapes as swirl and turbulence promoters. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 60: 42-48.
- Gnielinski V. (1976). New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. *Int. Chem.* 16: 359-367.
- Langeroudi H.G. and Javaherdeh K. (2018). Investigation friction factor and heat transfer characteristics of turbulent flow inside the corrugated tube inserted with typical and V-cut twisted tapes, *Heat and Mass Transfer*. 54: 1999-2008.
- Noothong W., Eiamsa-ard S. and Promvong P. (2006). Effect of twisted-tape inserts on heat transfer in a tube. *The 2nd Joint International conference on Sustainable Energy and Environment (SEE2006)*: 21-23.
- Nanan K., Yongsiri K., Wongcharee K., Thianpong C. and Eiamsa-ard S. (2013). Heat transfer enhancement by helically twisted tapes inducing co- and counter-swirl flows. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 46: 67-73.

Petukhov B.S. (1970). Heat transfer and friction in turbulent pipes flow with variable physical properties. In Advances in Heat Transfer. (6).

Sarada N., Raju S., Kalyani Radha A.V. and Shyam K. (2010). Enhancement of heat transfer using varying width twisted tape inserts. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2(6): 17-18.