

การเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อจตุรัสด้วยการใส่ครีบบาง

Performance Enhancement in a Square Duct Heat Exchanger with Baffles Inserts

ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์,¹ สุภัทรชัย สุวรรณพันธ์,² พงษ์เจต พรหมวงศ์,^{3*} สมพล สกุลหลง,⁴
Panuwat Hoonpong,¹ Supattarachai Suwannapan,² Pongjet Promvonge,^{3*} Sompol Skullong,⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อจตุรัสด้วยการใส่ครีบบาง โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้ ความสูงครีบบางต่อความสูงท่อหรืออัตราส่วนการปิดกั้นการไหล ($e/H=BR=0.2$ และ 0.3), มุมปะทะการไหล ($\alpha=60^\circ$ และ 90°) และใช้ระยะพิตช์ต่อความสูงท่อหรืออัตราส่วนระยะพิตช์ ($P/H=PR=1.5$) ทำการทดลองที่สภาวะพลาสม่าความร้อนที่ผิววงที่ใช้ความเร็วที่สอดคล้องกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในช่วงระหว่าง 4000 ถึง 23000 เพื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน จากการทดลองพบว่า การใช้ครีบบางที่ค่า $\alpha=90^\circ$ และ $BR=0.3$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่ากรณีอื่น ๆ ในขณะที่การติดตั้งครีบบางที่ค่า $\alpha=60^\circ$ และ $BR=0.3$ พบว่า มีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด

คำสำคัญ: ท่อจตุรัส, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การถ่ายเทความร้อน, ตัวประกอบเสียดทาน, ครีบบาง

Abstract

This work is a study of heat transfer and pressure loss behaviors in a square duct inserted with baffles using air as the test fluid. The effects of baffle parameters in the duct such as baffle to duct height ratios or blockage ratios; ($e/H=BR=0.2$ and 0.3), the attack angles; ($\alpha=60^\circ$ and 90°) and pitch to duct height ratio or pitch ratio; ($P/H=PR=1.5$) are investigated. The experiment is conducted at a constant surface heat flux condition and the air

¹อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี, 321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี 15000

¹Lecturer, Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University, 321 Naraimaharat Road, Talaychubsorn, Lopburi, 15000, Thailand

²นักศึกษา, รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

²Student, ³Asso. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

⁴อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา 199 หมู่ 6 ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

⁴Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University Si Racha Campus, 199 M.6, Tungsukhla, Si Racha, Chonburi, 20230, Thailand.

*Corresponding author: Pongjet Promvonge, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand. E-mail: kpongje@kmitl.ac.th

flow rate is varied in terms of Reynolds number ranging from 4000 to 23000. The experimental result is analyzed in term of the thermal enhancement factor. From the experiment found that the baffle with $\alpha=90^\circ$ and $BR=0.3$ provides Nusselt number and friction factor higher than other cases while the baffle with $\alpha=60^\circ$ and $BR=0.3$ yields the highest thermal enhancement factor.

Keywords: square duct, heat exchanger, heat transfer, friction factor, baffle.

บทนำ

เทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เงื่อนไขของรูปแบบพื้นผิวแบบต่าง ๆ ที่ช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยความเสียหายมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก เงื่อนไขดังกล่าวจะสามารถเพิ่มระดับความแรงของการไหลแบบปั่นป่วน, เพิ่มพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนและสร้างการไหลแบบหมุนวน ผลคือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อน แต่ก็ส่งผลต่อการสูญเสียความดันด้วยเช่นกัน ซึ่งจากเงื่อนไขเหล่านี้จะสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดเล็กและมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น การใช้ตัวสร้างความการหมุนวน (vortex generator) ติดตั้งไว้ภายในท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นที่นิยมค่อนข้างมากในการค้นคว้าวิจัยต่าง ๆ ปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน กล่าวคือ¹ ทำการศึกษาผลของครีบริบบแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยม โดยทำการศึกษารูปทรงครีบริบ 5 ชนิด ได้แก่ ครีบริบสี่เหลี่ยมรูปสามเหลี่ยม วงกลม ครีบริบวงกลมทรงต่ำ และครีบริบวงกลมทรงสูง จากการทดลองพบว่าครีบริบรูปสามเหลี่ยมมีค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีกว่าครีบริบอื่น ๆ² ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยติดครีบริบตัววีที่ผิว มีทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงข้ามกับการไหลพบว่า ครีบริบตัววีมีทิศทางตรงข้ามกับการไหลให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานมากกว่าครีบริบตัววีมีทิศทางเดียวกันกับการไหล³ ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและ

ความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีครีบริบบแบบต่าง ๆ พบว่า ครีบริบตัววีให้ค่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบอื่น ๆ⁴ ทำการศึกษาค่าการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมพบว่า ครีบริบภายในท่อสี่เหลี่ยมให้ค่าการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางครีบริบและรูปแบบครีบริบค่าการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงครีบริบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงครีบริบมีค่าลดลง⁵ ได้นำเสนอถึงการศึกษเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบ 3 มิติ ในช่องการไหลแบบจัตุรัส โดยมีการติดตั้งแผ่นกันเอียงที่ผนังผิวบนและผิวล่างตรงกันพบว่า การไหลแบบ P-vortex มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน⁶ ทำการศึกษาตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนของครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีค่าความสูงครีบริบแบบเท่ากันทั้งแผ่นและแบบไม่เท่ากัน ติดตั้งที่ผิวบนและล่างของช่องขนานพบว่า ครีบริบแบบความสูงเท่ากันให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าแบบความสูงไม่เท่ากัน⁷ ทำการศึกษาตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนของครีบริบสามเหลี่ยมมุมฉากด้านตั้งรับลมและด้านเอียงรับลม ครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วและสี่เหลี่ยมพบว่า การจัดวางครีบริบสามเหลี่ยมมุมฉากด้านตั้งรับลมจัดวางแบบแนวเดียวกันให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุดแต่ครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วจัดวางแบบเอียงกันให้ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด⁸ ได้ศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานในท่อจัตุรัสที่มีขดลวดเป็นตัวสร้างความปั่นป่วนพบว่า ขดลวดที่มีความยาวต่อเนื่องจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าขดลวดที่แบ่งเป็นส่วน ๆ

จากการศึกษางานวิจัยนี้ที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อรูปทรงต่าง ๆ และใช้ตัวสร้างการหมุนควงแตกต่างกันไป ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อจตุรัสที่ภายในท่อมีการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงแบบครีบบางซึ่งยังไม่มีการนำเสนอมาก่อน โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในสภาวะแบบปลั๊กความร้อนที่ผิวคงที่มีค่าอัตราส่วนการปิดกั้นการไหลเท่ากับ 0.2 และ 0.3, อัตราส่วนระยะพิตช์เท่ากับ 1.5 และมีมุมปะทะเท่ากับ 60° และ 90° ทำการทดสอบในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์ อยู่ในช่วง 4000 ถึง 23,000

ทฤษฎี

เป้าหมายของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อจตุรัส สมการเลขเรย์โนลด์ส์สามารถเขียนสมการในเทอมของเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) ได้ดังนี้

$$Re = UD_h / \nu \quad (1)$$

เมื่อ U และ ν เป็นความเร็วเฉลี่ยและความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{air} = Q_{conv} = \dot{m}C_p(T_o - T_i) = VI \quad (2)$$

$$h = \frac{Q_{conv}}{A(\tilde{T}_s - T_b)} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } T_b = (T_o + T_i) / 2 \quad (4)$$

$$\text{และ } \tilde{T}_s = \sum T_s / 28 \quad (5)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบการพา

\tilde{T}_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ย

T_s คือ อุณหภูมิผิวแต่ละจุดตามแนวยาวท่อ

T_i, T_o คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออก

\dot{m}, C_p, V และ I คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ตามลำดับ

เลขนัสเซิลต์เฉลี่ย (Nu) เขียนได้เป็น

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (6)$$

ตัวประกอบเสียดทาน (f) หาค่าได้จาก

$$f = \frac{2}{(L/D_h)} \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (7)$$

เมื่อ ΔP คือ ค่าความดันตกคร่อม

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหลจากสมบัติทางกายภาพของอากาศ ถูกกำหนดที่อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย (T_b) จากสมการ (4)

ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) สามารถหาค่าได้จากสมการข้างล่าง แนะนำโดย Webb [9]

$$TEF = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (8)$$

อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ชุดทดลอง แสดงใน Figure 1 ท่อจตุรัสมีความสูง (H) เท่ากับ 45 มิลลิเมตร, ส่วนทดสอบยาว (L) เท่ากับ 1000 มิลลิเมตร รูปครีบบางและลักษณะการติดตั้ง ดังแสดงใน Figure 2, พัดลมขนาด 1.45 กิโลวัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดของไหลทดสอบคืออากาศ, วาล์วควบคุมอัตราการไหลอากาศก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ, ออร์ฟิสมิเตอร์ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าชุดทดสอบ, เครื่องวัดความดันด้วยของเหลวใช้วัดความแตกต่างของความดันเพื่อใช้หาอัตราการไหลของอากาศ, ถังพักลมทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีความเสถียรก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ ท่อทดสอบถูกทำให้ร้อนด้วยแผ่นฮีตเตอร์, ตัวจัดเก็บข้อมูลเป็นอุปกรณ์เก็บค่าอุณหภูมิที่เชื่อมต่อกับเทอร์มอคัปเปิล ชนิด K ทั้งหมด 30 ตัว ซึ่งวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวตลอดทั้งส่วนทดสอบ 28 ตำแหน่ง รวมทั้งอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของส่วนทดสอบอีก 2 ตำแหน่ง, ดิจิตอลมานอมิเตอร์ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่งทางเข้าและทางออกของส่วนทดสอบ, คอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่บันทึกข้อมูลที่ได้จากตัวจัดเก็บข้อมูล, ส่วนทดสอบจะทำการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียจากแผ่นฮีตเตอร์ออกสู่บรรยากาศภายนอก

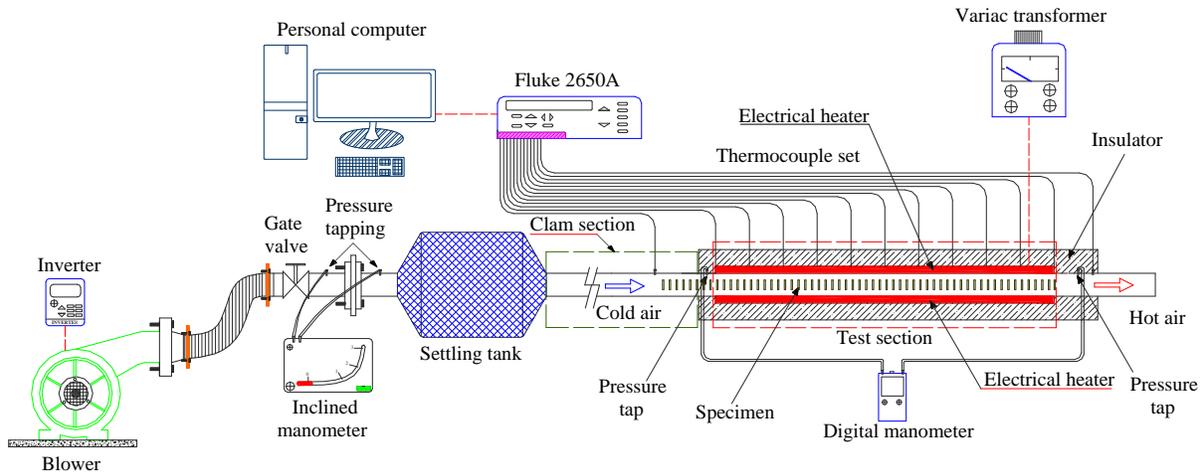


Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

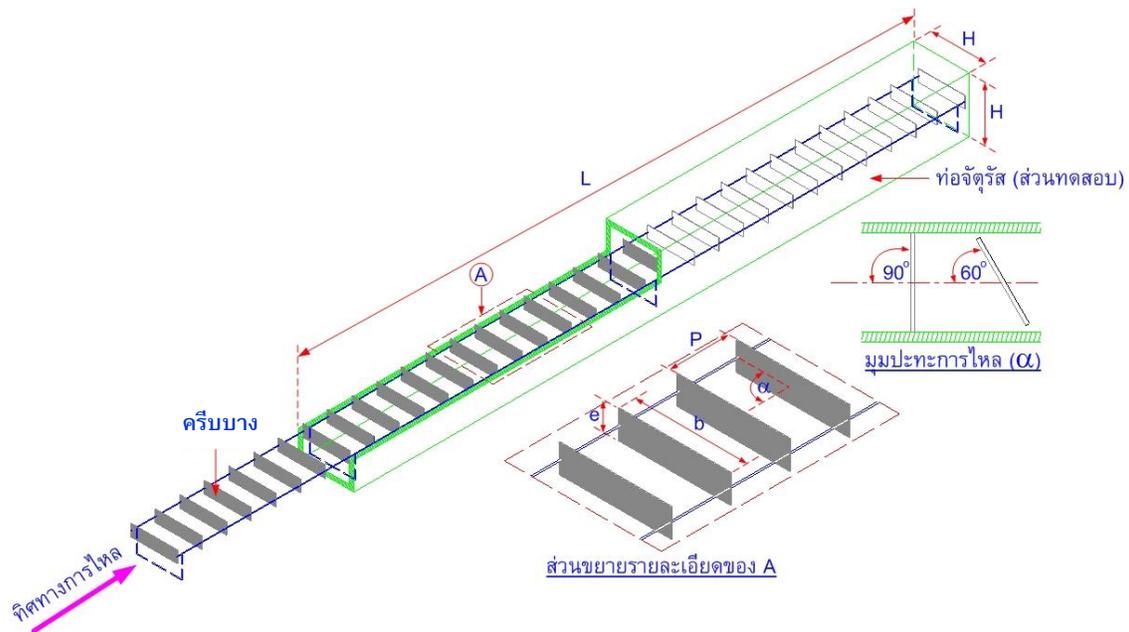


Figure 2. Test section with the baffle inserts.

ผลการทดลอง

เพื่อให้ได้ผลการทดลองนี้ที่ถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือ จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของเลขนัสเซลท์ และตัวประกอบเสียดทานของท่อผนังเรียบกับสหสัมพันธ์ของ Gnielinski และ Petukhov อ้างอิงในเอกสาร [10] ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ

สหสัมพันธ์ของ Gnielinski

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \tag{9}$$

สหสัมพันธ์ของ Petukhov

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \tag{10}$$

Figure 3 แสดงการเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองของท่อผนังเรียบเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของสมการ (9) และ (10) ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า มีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±3% สำหรับทั้งสหสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์และตัวประกอบเสียดทาน

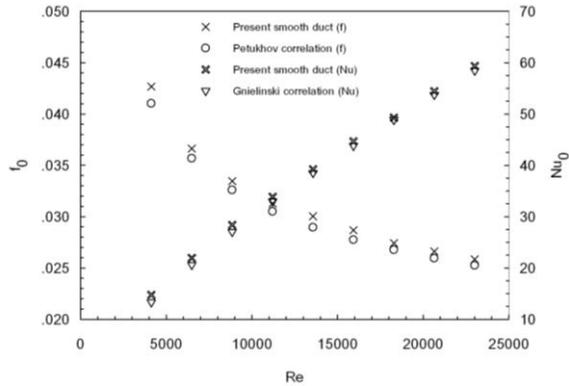


Figure 3. Validation of Nu and f for smooth duct.

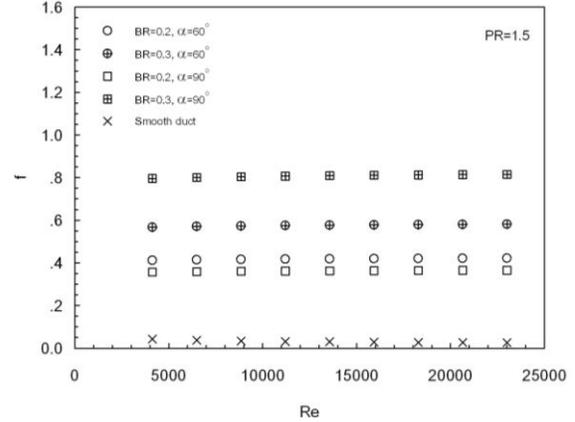


Figure 5. Variation of f with Re.

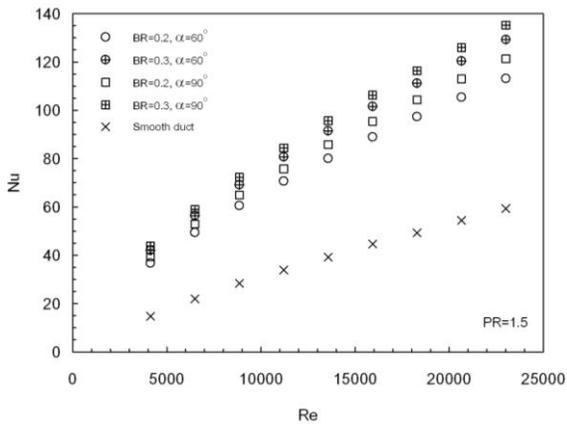


Figure 4. Variation of Nu with Re.

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์ส์มีค่าเพิ่มขึ้น จะให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันสำหรับทุกกรณี การติดตั้งครีบบางจะให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผนังเรียบ เนื่องจากครีบบางจะเป็นตัวกันการไหลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการไหลช่วยเพิ่มกระแสวนและปั่นป่วนทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นกว่าท่อผนังเรียบ

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์พบว่า เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้นค่าตัวประกอบเสียดทานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากกราฟค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง สำหรับทุกกรณี การติดตั้งครีบบางจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่มีผนังเรียบ เนื่องมาจากผลของการขวางการไหลของครีบบาง

Figure 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์ส์และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ส์ตามลำดับ พบว่า ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์มีค่าลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันพบว่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์ส์เพิ่มขึ้น ซึ่งกรณีที่ติดตั้งครีบบางที่ค่า BR = 0.3 และ $\alpha = 90^\circ$ ให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงกว่ากรณีอื่น ๆ โดยมีค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ มีค่าอยู่ระหว่าง 2.3-3.0 เท่า และมีค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานมีค่าอยู่ระหว่าง 18.6-31.3 เท่า เมื่อเทียบกับท่อผนังเรียบ

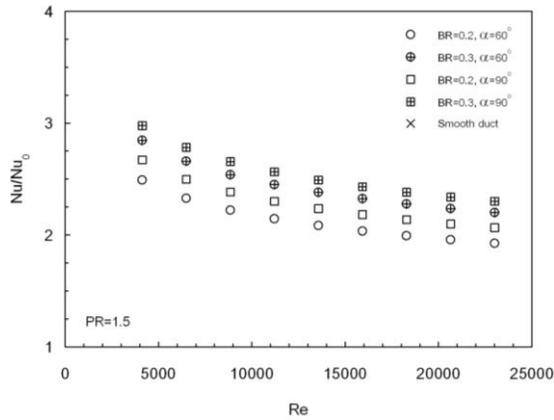


Figure 6. Variation of Nu/Nu_0 with Re .

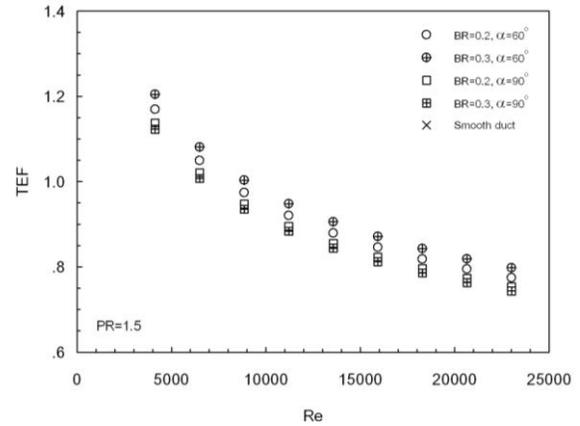


Figure 8. Variation of TEF with Re .

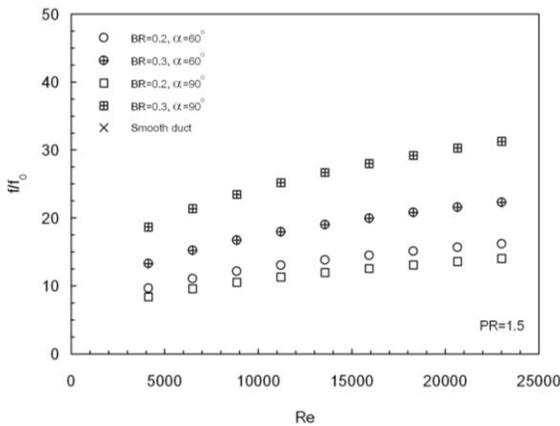


Figure 7. Variation of f/f_0 with Re .

Figure 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนกับเลขเรย์โนลด์ส ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์และอัตราส่วนค่าตัวประกอบเสียดทานโดยคิดที่กำลังขับเดียวกันพบว่า ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น กรณีที่ติดตั้งครีบบางที่ค่า $BR=0.3$ และ $\alpha=60^\circ$ ให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่ากรณีอื่น ๆ โดยมีค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8-1.2

สรุป

การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อจตุรัส โดยใช้ครีบบางติดตั้งภายในท่อทดสอบ มีมุมปะทะ (α) เท่ากับ 60° และ 90° , มีค่า PR เท่ากับ 1.5 และมีค่า BR เท่ากับ 0.2 และ 0.3 โดยทำการทดสอบในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ที่เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วง 4000 ถึง 23,000 จากการทดลองสรุปได้ว่าการติดตั้งครีบบางจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นแต่ก็ส่งผลทำให้การสูญเสียความดันเพิ่มสูงขึ้นด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่มีผนังเรียบ พบว่ากรณีที่ติดตั้งครีบบาง $BR=0.3$ และ $\alpha=90^\circ$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงกว่ากรณีอื่น ๆ ส่วนกรณีที่ติดตั้งครีบบาง $BR=0.3$ และ $\alpha=60^\circ$ จะให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงกว่ากรณีอื่น ๆ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.2 ที่เลขเรย์โนลด์สค่าต่ำสุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากการได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

เอกสารอ้างอิง

1. Ahn S.W. The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2001; 28:933-942.
2. Choi C, Rhee D.H, Cho H.H. Heat/mass transfer and pressure drop in a square duct with V-shaped ribs. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B* 2002; 26:1542-1551.
3. Han J.C, Zhang Y.M, Lee C.P. Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs. *ASME Journal of Heat Transfer* 1991; 113:590-596.
4. Tanda G. Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2004; 47:229-243.
5. P Promvong, W Jedsadaratanachai, S Kwankaomeng. Numerical study of laminar flow and heat transfer in square channel with 30° inline angled baffle turbulators. *Applied Thermal Engineering* 2010; 30:1292-1303.
6. Tianpong C, Chompookham T, Skullong S. Promvong P. Thermal characterization of turbulent flow in a channel with isosceles triangular ribs. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2009; 36:712-717.
7. Promvong P, Tianpong C. Thermal performance of turbulent channel flows over different shaped ribs. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2008; 35:1327-1334.
8. Eiamsa-ard S, Koolnapadol N, Promvong P. Heat transfer behavior in a square duct with tandem wire coil element insert. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 2012; 20:863-869.
9. Webb, R.L. Principles of enhanced heat transfer. John-Wiley & Sons, New York, USA; 1992. p. 166-194.
10. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., Introduction to heat transfer, 5th ed. John Wiley & Sons, USA; 2006.