

ผลของการจัดวางครีบบท่อนการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นติดครีบบท่อน

Effects of Rib Arrangements on Heat Transfer in a Square Duct with Double V-Ribbed Tape

ธีรพัฒน์ ชมภูคำ,^{*1} พงษ์เจต พรหมวงศ์²

Teerapat Chompookham,^{*1} Pongjet Promvong²

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการศึกษาเชิงทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งแผ่นติดครีบบท่อน ท่อทดสอบทำการทดลองที่สภาวะพลาสม่าความร้อนที่ผิวคงที่และใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองถูกปรับให้สอดคล้องกับค่าของเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) ช่วงระหว่าง 4000 ถึง 25,000 แผ่นติดครีบบท่อนทำการทดสอบโดยจัดวางครีบบท่อน 2 แบบ คือ แบบชี้ทวนกระแสการไหลและแบบชี้ตามกระแสการไหล, สัดส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงท่อ ($PR = P/H$) 2 ค่า คือ 1 และ 2, มุมปะทะ (α) = 30° และสัดส่วนความสูงครีบบท่อนต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.2 อิทธิพลของการจัดวางครีบบท่อนต่อคุณลักษณะทางความร้อนและความเสียดทานการไหลในท่อจะถูกทำการทดสอบ ผลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนแสดงในพจน์เลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu) และการสูญเสียความดันแสดงในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor, f) เปรียบเทียบกรณีติดตั้งแผ่นติดครีบบท่อนกับท่อผิวเรียบพบว่า ชุดทดลองที่มีแผ่นติดครีบบท่อนจัดวางครีบบท่อนชี้ตามทิศทางการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าแบบชี้ทวนทิศทางการไหล แผ่นติดครีบบท่อนจัดวางครีบบท่อนชี้ตามทิศทางการไหลที่ $PR = 1$ ให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.83 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ค่าต่ำสุด

คำสำคัญ: แผ่นติดครีบบท่อน เลขนัสเซลท์ ตัวประกอบเสียดทาน ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส

Abstract

The paper presents an experimental study on turbulent flow and heat transfer characteristics in a square duct fitted diagonally with double V-ribbed tapes. The tested duct has uniform heat-fluxed walls and the flow rate of air used as the test fluid is presented in terms of Reynolds number from 4000 to 25,000. The insertion of the ribbed tape is performed with two rib arrangements: pointing upstream and pointing downstream of the flow, two pitch ratios of rib pitch to duct height ($PR = P/H = 1$ and 2), attack angle (α) = 30° , rib-to-duct height ratios (b/H) = 0.2 with respect to the main flow direction. Influences of rib arrangement on thermal and

¹ อาจารย์, หน่วยวิจัยท่อความร้อนและการออกแบบเครื่องมือทางความร้อน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอ กันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

² รองศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10520

¹ Lecturer, Heat Pipe and Thermal Tools Design Research Unit (HTDR), Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham, 44150

² Assoc.Prof., Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

* Corresponding author: Teerapat Chompookham, Heat Pipe and Thermal Tools Design Research Unit (HTDR), Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai, Mahasarakham, 44150, teerapat.c@msu.ac.th

flow friction characteristics of the inserted duct are investigated. The experimental result of heat transfer in the form of Nusselt number and pressure drop in term of friction factor are compared between the duct mounted with double V-ribbed tapes and the smooth duct. The rib with pointing downstream arrangement gives higher heat transfer rate and friction factor than the one with pointing upstream arrangement. The Thermal enhancement factor (*TEF*) of the pointing downstream-ribs, $PR = 1$ is found to be the best among all turbulators used and is about 1.83 at the lowest value of Reynolds number.

Keywords: ribbed tape, Nusselt number, friction factor, square duct

บทนำ

ความต้องการระบบทางความร้อนประสิทธิภาพสูง ในงานต่าง ๆ ด้านวิศวกรรมประยุกต์ กระตุ้นให้เกิดความสนใจค้นคว้าวิธีการต่าง ๆ เพื่อพัฒนาระบบการถ่ายเทความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการพา โดยทั่วไปการพัฒนาในปัจจุบันใช้เทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้การปรับเปลี่ยนพื้นผิว เพื่อเชื่อมโยงเงื่อนไขแบบต่าง ๆ ที่ช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น โดยส่งผลให้ค่าความเสียดทานเพิ่มไม่มาก ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าว ได้แก่ (1) การทำลายชั้นขอบเขตและเพิ่มระดับความแรงของการไหลแบบปั่นป่วน, (2) เพิ่มพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน และ (3) สร้างการหมุนวนและการไหลแบบชั้นที่สอง การไหลแบบวอร์เทก (vortex) และการไหลแบบสเวลล์ (swirl) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการประยุกต์กับงานทางด้านวิศวกรรมหลาย ๆ ประเภท เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กระบวนการอบแห้งเตาเผาแบบวอร์เทก เป็นต้น ตัวสร้างการไหลแบบวอร์เทก (vortex generators) ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้งานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น ไบบิตคอยล์ ครีบบีค โดยอุปกรณ์สร้างการไหลแบบวอร์เทกนี้ส่วนใหญ่ถูกประยุกต์ใช้กับท่อกลม ขณะที่ครีบบีคมักถูกใช้กับท่อเหลี่ยมหรือท่อที่มีผนังท่อแบน ในระบบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพสูง ครีบบนเป็นช่วง ๆ (periodic) ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานประยุกต์ทางอุตสาหกรรม การติดตั้งครีบบนท่อจะช่วยป้องกันการพัฒนาชั้นขอบเขตทางความร้อนและช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ดียิ่งขึ้น ส่งผลต่อเนื้อหาทำให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อผิวเรียบมาก

ปัจจุบันมีงานวิจัยหลายงาน ทำการศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนและคุณลักษณะของการไหลในท่อที่มีการติดตั้งครีบบีค อาทิเช่น Benlu and Jiang¹ ศึกษาด้วยวิธีเชิงทดลองและวิธีเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ครีบบนเอียงทำมุม 0 ถึง 90 องศาทิศทางการไหล ความสูง 1 มิลลิเมตร กว้าง 1 มิลลิเมตร ระยะพิทช์ 4 มิลลิเมตร ผลจากวิธีเชิงตัวเลขพบว่า ครีบบนเอียงทำมุม 60 องศาให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความดันตกคร่อมสูงสุดแต่ครีบบนเอียงทำมุม 20 องศาให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนโดยรวมสูงสุดและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการไหลและการลดลงของระยะพิทช์ ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนโดยรวมสูงสุดเมื่อครีบบนเอียงทำมุม 20 องศาและค่าระยะพิทช์ระหว่าง 1-2 มิลลิเมตร Tenda² ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนสั้นเท่ากับ 5 โดยใช้ครีบบนรูปตัววีแบบแยกส่วน ทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 8900 ถึง 36,000 ที่สัดส่วนความสูงครีบบนต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.15 และ 0.25 ความขรุขระสัมพัทธ์ (b/D_h) = 0.009 และ 0.15 ระยะพิทช์สัมพัทธ์ (p/b) = 4, 8 และ 13.3 พบว่า เมื่อความสูงครีบบนมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยที่ระยะพิทช์สัมพัทธ์เท่ากับ 4 และ 13.3 ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของการทดสอบ Promvong and Thianpong³ ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งครีบบนรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว สามเหลี่ยมมุมฉากและสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบตรงกันและเยื้องกัน ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4000 ถึง 16,000 พบว่าครีบบนรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่จัดวางครีบบนเยื้องกันให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด แต่ครีบบน

สามเหลี่ยมมุมฉากจัดวางครีบบนตรงกันให้ค่าเลขนัยเชลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด Thianpong et al.⁴ ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5000 ถึง 22,000 โดยติดตั้งครีบบนสามเหลี่ยมหน้าจั่ว จัดวางครีบบน 2 แบบ คือแบบตรงกันและเอียงกัน ที่ระยะพิทช์เท่ากับ 40 มิลลิเมตร ติดตั้งครีบบนที่ผิวด้านบนและด้านล่างของท่อและสัดส่วนความสูงครีบบนต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.13, 0.2 และ 0.26 พบว่า ครีบบนสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่ $b/H = 0.26$ จัดวางครีบบนแบบตรงกัน ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานสูงสุดแต่ครีบบนที่ $b/H = 0.13$ จัดวางครีบบนแบบเอียงกันให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด SriHarsha et al.⁵ ศึกษาผลของความสูงของครีบบนต่อการกระจายตัวของการถ่ายเทความร้อนในผนังสองชั้นของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้ครีบบนแบบต่อเนื่องทำมุม 90° และครีบบนแบบแยกส่วนทำมุม 60° ทดสอบในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 10,000 ถึง 30,000 พบว่า เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อน ครีบบนแบบต่อเนื่องทำมุม 90° ให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงของครีบบนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันเมื่อเปรียบเทียบที่ความสูงเดียวกัน ครีบบนทำมุม 60° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบบนทำมุม 90° เนื่องจากครีบบนแยกส่วนทำมุม 60° ให้ค่าความดันสูญเสียน้อยกว่า Kumar et al.⁶ ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในตัวทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน โดยการใช้ครีบบนรูปตัวบีทดสอบโดยให้ความร้อนที่ผิวด้านเดียว ส่วนด้านอื่น ๆ ทำการหุ้มฉนวนทั้งหมด ที่ค่าอัตราส่วนสนทัด (Aspect Ratio; AR) = 8 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 3000 ถึง 15,000, $b/D_n = 0.0168-0.0338$, $P/b = 10$ และมุมปะทะในช่วง 30° ถึง 75° เปรียบเทียบผลทดลองกับท่อผิวเรียบและสร้างสมการสหสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานการไหล สกุกหลงและคณะ⁷ ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5000 ถึง 23,000 โดยใช้ปีกสามเหลี่ยม ติดตั้งที่ผิวด้านล่างของท่อทดสอบ ที่สัดส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงท่อ (PR) = 2 มุมปะทะ 30 องศาและมีสัดส่วนความสูงครีบบนต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.2,

0.3 และ 0.4 พบว่า การติดตั้งปีกสามเหลี่ยมที่ $b/H = 0.4$ ให้ค่าเลขนัยเชลท์สูงสุดแต่ตัวประกอบเสียดทานก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่ $b/H = 0.2$ ให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีอื่น หุ่นพงษ์และคณะ⁸ ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งแผ่นครีบบนเอียงทำมุม ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4000 ถึง 40,000 โดยครีบบนทำมุมเอียง 45 องศา ติดตั้งที่ผิวด้านล่างของผนังท่อทดสอบ สัดส่วนความสูงครีบบนต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.1, 0.3 สัดส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงท่อ $PR = 1, 2$ ผลจากค่าการทดลองแสดงในพจน์ของเลขนัยเชลท์และตัวประกอบความเสียดทาน พบว่า ครีบบนเอียงทำมุมที่ค่า $b/H = 0.3$ และ $PR = 1$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานมากกว่าที่สัดส่วนความสูงครีบบนอื่น ๆ ชมภูคำและคณะ⁹ ศึกษาเชิงทดลองของการไหลแบบปั่นป่วนและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งแผ่นติดครีบบนรูปทรง W ที่การให้ความร้อนแบบสภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิววงที่ ใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ ในช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 4000 ถึง 38,000 แผ่นติดครีบบนมุมปะทะเท่ากับ 10° , 15° และ 20° สัดส่วนระยะพิทช์ต่อความสูงท่อ ($PR = P/H$) = 1 และสัดส่วนความสูงครีบบนต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.2 พบว่า ชุดทดลองที่มีแผ่นติดครีบบนรูปทรง W มุมปะทะ 20° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุด ตามด้วยแผ่นติดครีบบนมุมปะทะ 15° , 10° และท่อผิวเรียบตามลำดับ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบติดตั้งด้วยการสอดเข้าไปในท่อ โดยอาศัยแนวคิดจากการที่ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถแบ่งตามแนวเส้นทแยงมุม ออกเป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่วสองส่วน จากนั้นแล้วจะสามารถติดตั้งครีบบนตัววีคู่ที่ฐานของสามเหลี่ยมหน้าจั่ว (ในแนวทแยงมุมของท่อจัตุรัส) ทั้งสองด้านได้และเป็นการประยุกต์ใช้ข้อดีของอุปกรณ์สร้างการปั่นป่วน (turbulators) แบบครีบบนปีกและใบพัดเพื่อใช้งานร่วมกัน คือ จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเนื่องจากติดตั้งครีบบน, การลดความดันตกคร่อมเนื่องจากมุมเอียงของครีบบนตัววีคู่, การไหลแบบวอลเทคและแบบสเวลล์เหมือนกับการติดตั้งปีกและการใช้งานที่สะดวกเหมือนกับการประยุกต์ใช้คอยล์และใบพัด ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาผลของการจัดวางครีบบนบนแผ่นทดสอบต่อคุณลักษณะทางความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งแผ่นติดครีบบนตัววีคู่ โดยการ

สอดเข้าไปในท่อตามแนวทแยงมุม จัดวางครีบบ 2 แบบ คือ แบบซี่ทวนกระแสการไหลและแบบซี่ตามกระแสการไหล, สัดส่วนระยะพิชต์ของครีบบต่อความสูงท่อ ($PR = P/H$) 2 ค่า คือ 1 และ 2, มุมปะทะ (α) = 30° และ สัดส่วนความสูงครีบบต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.2 ในช่วงเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 4000 ถึง 25,000

ทฤษฎี

เป้าหมายของงานวิจัยนี้เพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนในท่อในพจน์ของเลขนัสเซลท์ โดยเลขเรย์โนลด์เขียนในพจน์ของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) สามารถเขียนได้เป็น

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

เมื่อ U และ ν เป็นความเร็วเฉลี่ยและความหนืดเชิงจลน์ของอากาศตามลำดับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาค่าได้จากกฎการวัดอุณหภูมิและความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ ความร้อนที่ให้กับอากาศ (Q_{air}) และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังท่อกับอุณหภูมิของอากาศ ($T_w - T_b$), สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้จากข้อมูลทดลองดังสมการ

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

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

โดยที่

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

และ

$$\tilde{T}_s = \sum \tilde{T}_s / n \quad (5)$$

พจน์ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนแบบการพาของผนังด้านบนของท่อที่ถูกให้ความร้อน เมื่อ \tilde{T}_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยที่ได้จากอุณหภูมิผิวในแต่ละจุด (T_s) ตามแนวยาวของท่อ, T_i , T_o คือ อุณหภูมิทางเข้าและทางออกตามลำดับ พจน์ \dot{m} , c_p , V , I และ n คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, ความต่างศักย์, กระแสไฟฟ้า และตำแหน่งวัดอุณหภูมิผิวทดสอบ ตามลำดับ เลขนัสเซลท์เฉลี่ย (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 และ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล คุณสมบัติทางกายภาพของอากาศ ถูกกำหนดที่อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย (T_b) จากสมการ (4)

เมื่อพิจารณาที่สภาวะกำลังขับ (pumping power) เดียวกัน

$$(\dot{V}\Delta P)_0 = (\dot{V}\Delta P) \quad (8)$$

เมื่อ \dot{V} เป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ เมื่อเขียนในพจน์ของตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ได้เป็น

$$(f Re^3)_0 = (f Re^3) \quad (9)$$

$$Re_0 = Re(f/f_0)^{1/3}$$

ตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (thermal enhancement factor, TEF) คือ อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวทดสอบ (h) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนพื้นผิวเรียบ (h_0) กำลังขับเดียวกัน จากข้อแนะนำของ Webb¹⁰ เขียนได้เป็น

$$TEF = \frac{h}{h_0} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_0} \bigg|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (10)$$

อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความสูง (H) = 45 มิลลิเมตร, ส่วนทดสอบ (test section) ยาว (L) = 1000 มิลลิเมตร ครีบบตัววีคู่ (double V-rib) มีสัดส่วนความสูงครีบบต่อความสูงท่อ (b/H) = 0.2 สัดส่วนระยะพิชต์ต่อความสูงท่อ (PR) = 1 และ 2 ที่มุมปะทะ (α) = 30° จัดวางครีบบแบบซี่ทวนกระแสการไหลและแบบซี่ตามกระแสการไหล ทำการติดตั้งครีบบที่ผิวทั้งสองด้านของแผ่นทดสอบทำหน้าที่เป็นตัวสร้างการไหลแบบหมุนวน

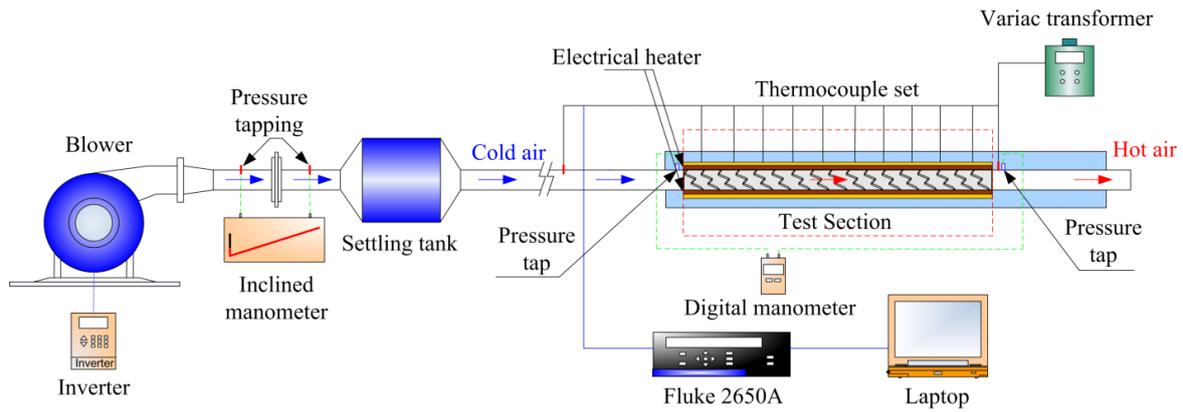


Figure 1 Schematic diagram of experimental apparatus

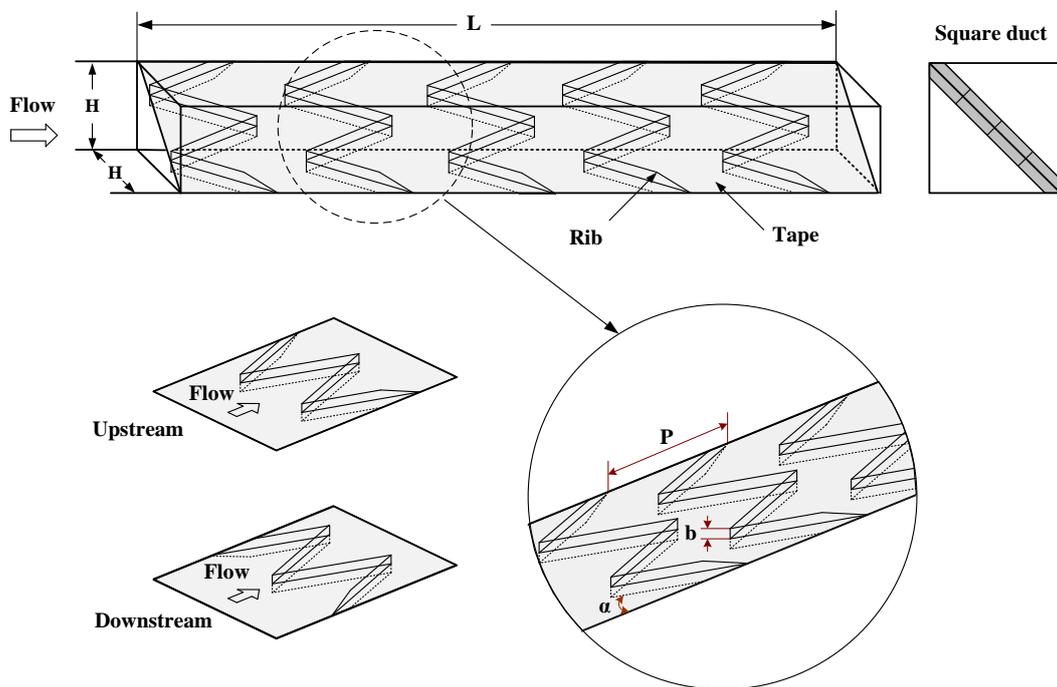


Figure 2 Test section with double V-ribbed tape

ตั้งแสดงในรูปที่ 2 พัดลม (high-pressure blower) รุ่น TB-150 มีขนาด 1.5 กิโลวัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดการไหลของอากาศ โดยมีอินเวอร์เตอร์ (inverter) สำหรับควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์พัดลมเพื่ออัตราการไหลอากาศตามที่ออกแบบไว้เข้าสู่ส่วนทดสอบ, เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอริฟิส (orifice meter) ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าชุดทดลอง โดยมีเครื่องวัดความดันแบบระนาบเอียง (inclined manometer) ใช้อ่านค่าจากความแตกต่างของน้ำมันเกาสีแดง (red gage oil มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.826) สำหรับคำนวณความแตกต่างของความดันเพื่อ

ใช้อัตราการไหลของอากาศ, ถังพักลม (settling tank) มีหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศให้มีการไหลปั่นป่วนน้อยที่สุด, ท่อปรับสภาพการไหล เพื่อให้อากาศที่ไหลก่อนเข้าสู่ชุดทดลองมีลักษณะเป็นแบบปรับตัวเต็มที่แล้วไหลเข้าสู่ส่วนทดสอบ, แผ่นทำความร้อนไฟฟ้า (electrical heater) ขนาด 2000 วัตต์ ติดตั้งที่ผิวด้านนอกของท่อทั้งสี่ด้านทำหน้าที่สร้างความร้อนให้กับผิวทดสอบ โดยมีเครื่องควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้า (variac transformer) รุ่น TDGC 2-3 กิโลโวลต์แอมแปร์ กำลังไฟที่จ่ายได้ 3000 โวลต์แอมแปร์ กระแสไฟสูงสุด 12 แอมแปร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความต่าง

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับแผ่นทำความร้อนเพื่อควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นทำความร้อนให้ได้ตามที่กำหนด, เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) รุ่น FLUKE 2680A เป็นอุปกรณ์เก็บและแสดงข้อมูลอุณหภูมิที่ผิว 30 ตำแหน่ง, อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออก เชื่อมต่อข้อมูลกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ทั้งหมด 30 ตัว, เครื่องวัดความดันตกคร่อมแบบดิจิตอล (digital manometer) รุ่น Dwyer 475 Mark III เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่งทางเข้าและตำแหน่งทางออกของส่วนทดสอบ, คอมพิวเตอร์ (laptop) ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลที่รับจาก เครื่องบันทึกข้อมูลและเครื่องวัดความดันตกคร่อม โดยส่วนทดสอบมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากแผ่นทำความร้อนไหลออกสู่ภายนอก

ผลการทดลอง

การศึกษาเชิงทดลองนี้เพื่อศึกษาถึงผลของลักษณะการจัดวางครีบท่อนบนแผ่นติดครีบท่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นติดครีบท่อตัวคู่ ผลของการถ่ายเทความร้อนแสดงในพจน์เลขนัสเซลท์ (Nusselt number, Nu) และการสูญเสียความดันแสดงในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (friction factor, f) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังนี้

ผลการทวนสอบท่อผิวเรียบ

การทดลองนี้ศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันของท่อผิวเรียบในพจน์ของเลขนัสเซลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน (f) ตามลำดับ ผลการทดลองของเลขนัสเซลท์ที่ได้เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และของ Gnielinski ส่วนผลการทดลองของตัวประกอบเสียดทานที่ได้เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius และของ Petukhov จากเอกสารอ้างอิง¹⁰ ในช่วงการไหลปั่นป่วน สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter,

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \text{ การให้ความร้อน} \quad (11)$$

สหสัมพันธ์ของ Gnielinski,

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (12)$$

$3000 < Re < 5 \times 10^6$

สหสัมพันธ์ของ Blasius,

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (13)$$

สหสัมพันธ์ของ Petukhov,

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2}, 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (14)$$

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์์กรณีท่อผิวเรียบ พบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซลท์ของผลทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และของ Gnielinski พบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าเลขนัสเซลท์จากผลการทดลองให้ค่าน้อยกว่าจากสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter แต่มีค่ามากกว่าสหสัมพันธ์ของ Gnielinski โดยค่าจากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.8% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และเท่ากับ 3.5% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Gnielinski ที่ใช้หาค่าเลขนัสเซลท์สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลมผิวเรียบ

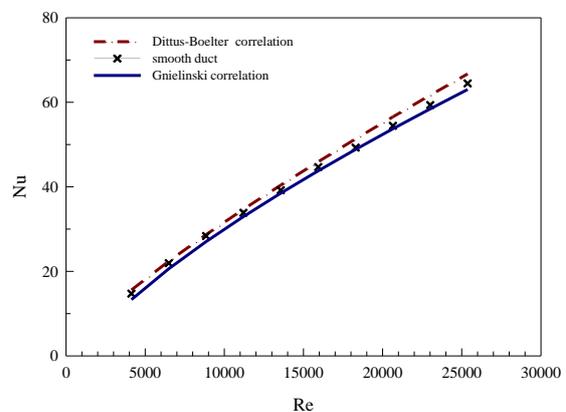


Figure 3 Validation of Nusselt number for smooth square duct

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์์กรณีท่อผิวเรียบ จากผลการทดลองพบว่า ค่าตัวประกอบเสียดทานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเลขเรย์โนลด์์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าประกอบเสียดทานจากการทดลองและค่าตัวประกอบเสียดทานจากสหสัมพันธ์ของ Petukhov และของ

Blasius พบว่า ค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่ามากกว่าจากสหสัมพันธ์ของ Petukhov และของ Blasius โดยค่าจากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.1% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Petukhov และเท่ากับ 3.6% เมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius ที่ใช้หาค่าตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่ในท่อกลมผิวเรียบ

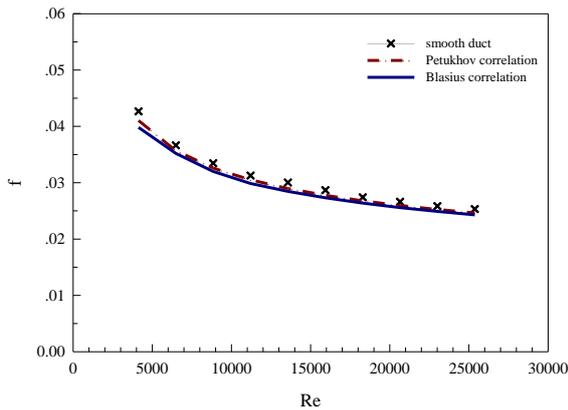


Figure 4 Validation of friction factor for smooth square duct

ผลการทวนสอบท่อผิวเรียบโดยเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ที่น่าเชื่อถือและได้รับความนิยม โดยเลขนัสเซลท์เปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และของ Gnielinski พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.8% และ 3.5% ตามลำดับ ส่วนตัวประกอบเสียดทานเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Petukhov และของ Blasius พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.1% และ 3.6% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าการทวนสอบท่อผิวเรียบมีความเชื่อถือได้ ซึ่งโดยทั่วไปผลการทดลองสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่ควรเกิน 10%^{3,4}

การถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของเลขนัสเซลท์กับเลขเรย์โนลด์พบว่า เมื่อเลขเรย์โนลด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ผลของการติดตั้งแผ่นติดครีบริบตัววีคูส่งผลให้ค่าเลขนัสเซลท์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับท่อผิวเรียบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การจัดวางครีบริบบนกระแสการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าแบบซี่ทวนกระแสการไหล และที่ $PR = 1$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ $PR = 2$

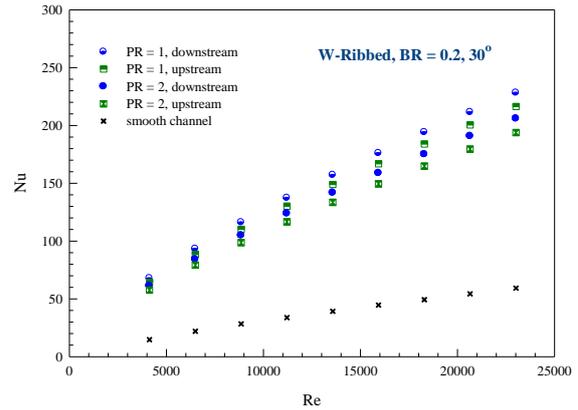


Figure 5 Variation of Nusselt number with Reynolds number for various inserts

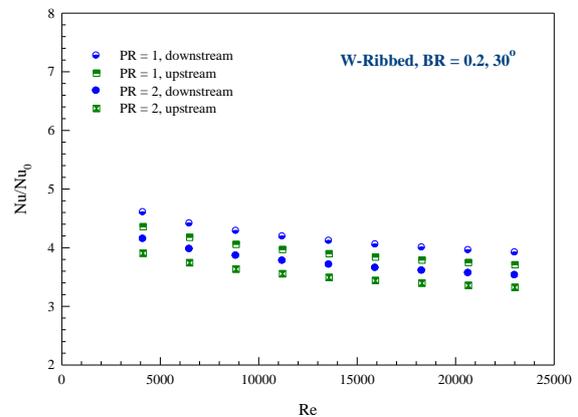


Figure 6 Variation of Nusselt number ratio with Reynolds number for various inserts

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลท์กรณีทดสอบต่อเลขนัสเซลท์ของผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์ จากการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์ต่อเลขนัสเซลท์ของผิวเรียบค่อนข้างคงที่เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการจัดวางครีบริบบนซี่ตามกระแสการไหลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์สูงกว่าแบบซี่ทวนกระแสการไหล โดยการจัดวางครีบริบบนซี่ตามกระแสการไหลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เฉลี่ยของมากกว่าผิวเรียบ 4.17 และ 3.76 เท่า ที่ $PR = 1$ และ 2 ตามลำดับ และการจัดวางครีบริบบนซี่ทวนกระแสการไหลให้ค่าอัตราส่วนเลขนัสเซลท์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 3.95 และ 3.54 เท่า ที่ $PR = 1$ และ 2 ตามลำดับ เนื่องจากแผ่นติดครีบริบวีคูที่ติดตั้งเข้าไปในท่อทดสอบเป็นตัวสร้างการไหลแบบวอร์เทคตามยาว (longitudinal vortex flow) ซึ่งช่วยเพิ่มระดับความปั่นป่วนของการไหลและนำการไหลแกนหลัก (central core flow) ไปใกล้กับ

ขอบเขตผนังร้อนและเหนียวทำให้เกิดการไหลแบบกระแทก (impingement flow) ที่บริเวณผิวร้อนของท่อ โดยการไหลแบบวอร์เทกซ์สามารถเข้าในบริเวณขอบเขตมุมของท่อแล้วช่วยทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้น¹⁰ และซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ $PR = 1$ ทำให้เกิดการขัดขวางการไหลและระดับความแรงของการไหลแบบปั่นป่วนสูงกว่า ที่ $PR = 2$ เป็นผลให้เกิดการไหลแบบวอร์เทกซ์ที่รุนแรงกว่า ส่งผลต่อเนื่องให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีกว่าด้วยตามมา

ความเสียดทานการไหล

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานและเลขเรย์โนลด์พบว่า เมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นการติดตั้งแผ่นติดครีบอกตัววีคมีค่าลดลงเล็กน้อย การจัดวางครีบอกซี่ตามกระแสการไหลให้ค่าการสูญเสียความดันที่สูงกว่าแบบซี่ทวนกระแสการไหล และที่ $PR = 1$ ให้ค่าการสูญเสียความดันสูงกว่าที่ $PR = 2$

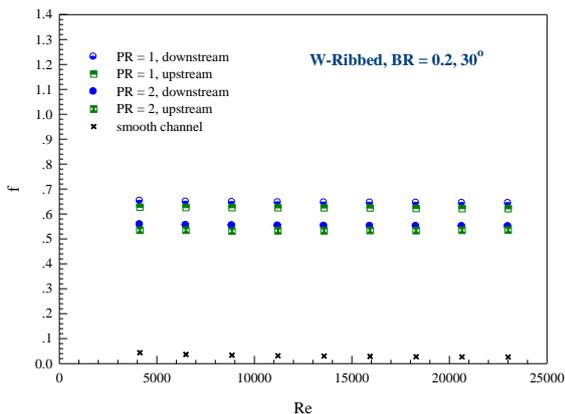


Figure 7 Variation of friction factor with Reynolds number for various inserts

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีทดสอบต่อท่อผิวเรียบกับเลขเรย์โนลด์พบว่า อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีทดสอบต่อตัวประกอบเสียดทานของผิวเรียบมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น แผ่นครีบอกซึ่งติดตั้งครีบอกซี่ตามกระแสการไหลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าแบบซี่ทวนกระแสการไหล โดยการติดตั้งครีบอกซี่ตามกระแสการไหลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยของมากกว่าผิวเรียบ 27.45 และ 20.13 เท่าที่ $PR = 1$ และ 2 ตามลำดับ และการติดตั้งครีบอกซี่ทวนกระแสการไหลให้ค่าอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน

เฉลี่ยของมากกว่าผิวเรียบ 24.67 และ 17.56 เท่าที่ $PR = 1$ และ 2 ตามลำดับ เนื่องจากที่ $PR = 1$ เกิดการขวางการไหล (flow blockage) และพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงกว่า เป็นผลให้เกิดการไหลกลับ (reverse flow) มากกว่าส่งผลให้เกิดการสูญเสียความดันที่สูงกว่าตามมา

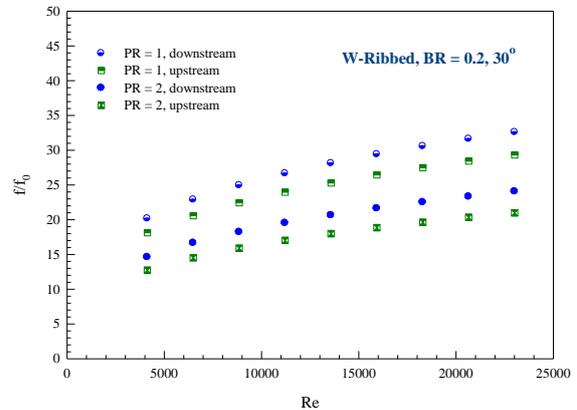


Figure 8 Variation of friction factor ratio with Reynolds number for various inserts

สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

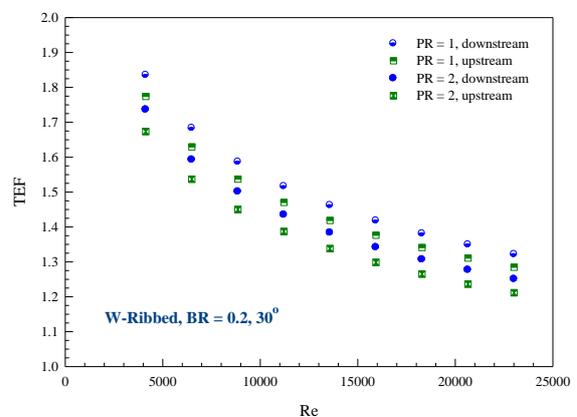


Figure 9 Variation of Thermal Enhancement Factor with Reynolds number for various inserts

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากค่าเลขนัสเซลท์และค่าตัวประกอบเสียดทานโดยพิจารณาที่กำลังขับเดียวกันพบว่า ตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น การติดตั้งแผ่นติดครีบอกซี่ตามกระแสการไหลให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่า

ครีบบั้ววางแบบซี่ทวนกระแสการไหล โดยการติดตั้งครีบบั้วตามกระแสการไหลให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.51 และ 1.43 ที่ $PR = 1$ และ 2 ตามลำดับ และการติดตั้งครีบบั้วซี่ทวนกระแสการไหลให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.46 และ 1.38 ที่ $PR = 1$ และ 2 ตามลำดับ

สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในทอสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้แผ่นติดครีบบั้วตัววีคู๋ ติดตั้งโดยการสอดเข้าไปในแนวทะแยงมุมของทอและครีบบั้วติดตั้งที่ผิวบนและผิวล่างของแผ่นทดสอบ จัดวางครีบบั้วแบบซี่ทวนกระแสการไหลและแบบซี่ตามกระแสการไหลที่ $PR = 1$ และ 2 ทดสอบในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลด์ตั้งแต 4000 ถึง 25,000 พบว่าครีบบั้ววางแบบซี่ตามกระแสการไหลให้การสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นสูงกว่าแบบซี่ทวนกระแสการไหลและให้ค่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับทอผิวเรียบสูงกว่าแบบซี่ทวนกระแสการไหลด้วย โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับทอผิวเรียบมีแนวโน้มเกือบคงที่เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น และการติดตั้งแผ่นติดครีบบั้ววางแบบซี่ตามกระแสการไหลให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบบั้ววางแบบซี่ทวนกระแสการไหล ครีบบั้วที่ $PR = 1$ ให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบบั้วที่ $PR = 2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้แผ่นติดครีบบั้วตัววีคู๋ โดยการจัดวางครีบบั้วแบบซี่ตามทิศทางการไหลที่ $PR = 1$ ให้ค่าตัวประกอบสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.83 เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าต่ำสุดในขอบเขตการทดสอบและมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้ปีงบประมาณ 2556 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

1. Benlu, Pei-Xue Jiang. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs. *Experimental Thermal and Fluid science* 2006;30:513–521.
2. Tanda G. Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 2004;47: 229–243.
3. Promvong P, Thianpong C. Thermal performance of turbulent channel flows over different shaped ribs. *Int Comm. Heat Mass Transfer* 2008;35:1327–1334.
4. Thianpong C, Chompookham T, Skullong S, Promvong P. Thermal characterization of turbulent flow in a channel with isosceles triangular ribs. *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 2009;36:712–717.
5. SriHarsha V, Prabhu SV, Vedula RP. Influence of rib height on the local heat transfer distribution and pressure drop in a square channel with 90° continuous and 60° V-broken ribs. *Applied Thermal Engineering* 2009;29: 2444-2459.
6. Arvind Kumar, Bhagoria JL, Sarviya RM. Heat transfer and friction correlations for artificially roughened solar air heater duct with discrete W-shaped ribs. *Energy Conversion and Management* 2009;50(8):2106-2117.
7. สมพล สกุลหลง, มนต์ศักดิ์ พิมสาร, พงษ์เจตพรหมวงศ์. การเพิ่มสมรรถนะความร้อนในทอโดยใช้ปีกสามเหลี่ยม. ใน: การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12; 31 มีนาคม-1 เมษายน 2554; สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. จังหวัดชลบุรี; 2554.

8. ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์, สมพล สกุลหลง, พงษ์เจต พรหมวงศ์. การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ครีบบีบเอียงทำมุม. ใน: การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13; 4-5 เมษายน 2555; มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. จังหวัดเชียงใหม่; 2555.
9. ธีรพัฒน์ ชมภูคำ, สิริสวัสดิ์ จิ่งเจริญนิรชร, พงษ์เจต พรหมวงศ์. คุณลักษณะทางความร้อนของท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้แผ่นตัดครีบบรูปทรง W. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9; 8-10 พฤษภาคม 2556; มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. จังหวัดนครนายก; 2556.
10. Webb RL. Principles of Enhanced Heat Transfer. New York:John-Wiley & Sons; 1992.