

# E-NETT 13<sup>TH</sup>

การประชุมวิชาการ

## เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13

13<sup>TH</sup> CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND

“ Sustainable Energy Development for Community and Innovation ”

31 พ.ค. - 2 มิ.ย. 2560 ณ โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่



**MAEJO  
GO ECO  
UNIVERSITY**

### กำหนดการ

- ..... ส่งบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์
- ..... ต้อนรับบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์
- ..... ส่งบทความวิจัยฉบับสมบูรณ์ (แก้ไข)
- ..... ลงทะเบียนล่วงหน้า
- ..... จัดงานประชุม E-NETT 13

- ก่อน วันที่ 17 เมษายน 2560
- วันที่ 30 เมษายน 2560
- ก่อน วันที่ 12 พฤษภาคม 2560
- วันที่ 1-26 พฤษภาคม 2560
- วันที่ 31 พฤษภาคม - 2 มิถุนายน 2560

จัดการประชุมโดย : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

|                |                                                                                                                                                        |     |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ENETT13-MP-44  | ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้ของผู้บริโภคสถานบริการก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์                                                                        | 144 |
| ENETT13-MP-54  | การศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงานอุตสาหกรรม ภายใต้มาตรการสนับสนุนสองประเภท                            | 145 |
| ENETT13-MP-83  | การเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนตามแนวแกน                                                               | 146 |
| ENETT13-MP-96  | การประยุกต์ใช้ระบบบริหารจัดการพลังงานในภาคขนส่ง                                                                                                        | 147 |
| ENETT13-MP-133 | การประเมินผลกระทบของการใช้พื้นที่ทางการเกษตรสำหรับที่ตั้งโรงไฟฟ้าโฟโตโวลตาอิก                                                                          | 148 |
| ENETT13-MP-134 | การศึกษาโครงสร้างค่าไฟฟ้าสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีระบบกักเก็บพลังงาน                                                                            | 149 |
| ENETT13-MP-136 | การพัฒนาแนวทางการออกแบบ และเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อน ของเปลือกอาคาร ที่สอดคล้องกับแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี ในอาคารชุดพักอาศัย         | 150 |
| ENETT13-MP-144 | เศรษฐศาสตร์พลังงานของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่อยู่อาศัยภายใต้นโยบายหักลบหน่วย                                                          | 151 |
| ENETT13-MP-174 | อัตรารับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตจากโซลาร์เซลล์ติดตั้งบนหลังคาบ้านพักอาศัยที่เหมาะสมภายใต้รูปแบบเน็ตมิเตอร์ริง                                                  | 152 |
| ENETT13-MP-249 | สมรรถนะระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระดับครัวเรือนในประเทศไทย                                                                                         | 153 |
| ENETT13-MP-260 | การศึกษาต้นทุนการผลิตในกระบวนการผลิตเอทานอลจากเปลือกสับปะรด (Ananas comosus)                                                                           | 154 |
| ENETT13-MP-274 | [แก้ไข] การวิเคราะห์พฤติกรรมการขับขี่เพื่อประมาณปริมาณพลังงานเมื่อใช้รถยนต์ไฟฟ้าแทนรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ในกรุงเทพมหานคร                        | 155 |
| ENETT13-MP-279 | การเลือกสารเปลี่ยนสถานะสำหรับระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารเพื่อการปรับอากาศ ในเขตร้อนชื้นด้วยวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์                     | 156 |
| ENETT13-MP-285 | อิทธิพลของครีบบางเอียงต่อพฤติกรรมเชิงความร้อนในห้องจัดสุต                                                                                              | 157 |
| ENETT13-MP-292 | ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานทดแทนของผู้บริโภคในจังหวัดแพร่                                                       | 158 |
| ENETT13-MP-294 | การพัฒนาศูนย์การเรียนรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานสะอาดเพื่อสุขภาพของชุมชน                                                                             | 159 |
| ENETT13-MP-312 | การศึกษาทบทวนและทดสอบผลิตภัณฑ์เครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์เพื่อกำหนดค่ามาตรฐานประสิทธิภาพพลังงาน                                                   | 160 |
| ENETT13-MP-313 | การศึกษาทบทวนและทดสอบผลิตภัณฑ์ตู้เย็นเพื่อกำหนดค่ามาตรฐานประสิทธิภาพพลังงาน                                                                            | 161 |
| ENETT13-MP-315 | การศึกษาทบทวนและทดสอบผลิตภัณฑ์ตู้แช่เย็นแสดงสินค้าเพื่อกำหนดค่ามาตรฐานประสิทธิภาพพลังงาน                                                               | 162 |
| ENETT13-OF-4   | การผลิตไฮโดรเจนด้วยสาหร่ายสีเขียว Tetraspora sp. CU2551 ที่ถูกตรึงในแคลเซียมอัลจิเนตผ่านวัฏจักรการผลิตซ้ำใหม่ด้วยระบบการสังเคราะห์แสงและการขาดออกซิเจน | 163 |
| ENETT13-OF-25  | สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันขั้นตอนเดียว: วิธีพื้นผิวตอบสนอง                                     | 164 |
| ENETT13-OF-26  | การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันเมล็ดสะเดา ที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย                                                  | 165 |

## การเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงตามแนวแกน Enhancement of thermal performance of heat exchanger tube using longitudinal vortex generators

ภาณุวัฒน์ ทุนพงษ์<sup>1</sup>, โชติวุฒิ ประสพสุข<sup>1</sup>, พงษ์เจต พรหมวงศ์<sup>2</sup>, สมพล สกกุลหลง<sup>3\*</sup> และสุธาทิพย์ วิทย์ปิยานนท์<sup>4</sup>

<sup>1</sup> สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>3</sup> กลุ่มวิจัยระบบพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

199 หมู่ 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

<sup>4</sup> กลุ่มวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตศรีราชา 199 หมู่ 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

\*ผู้ติดต่อ: E-mail: sfengsps@src.ku.ac.th, sompol@eng.src.ku.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออิทธิพลของแผ่นปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ติดตั้งในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในสภาวะปลั๊กความร้อนของท่อที่เพื่อศึกษาคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานการไหล การทดลองดำเนินการโดยใช้แผ่นปีกสี่เหลี่ยมผืนผ้าในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน แผ่นปีกมีมุมปะทะ  $30^\circ$  สัดส่วนระยะพิชิตตามแนวการไหลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 4 ค่า ( $PR=P/D = 0.5, 1.0, 1.5$  และ  $2.0$ ) และสัดส่วนความสูงปีกต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อค่าเดียว ( $BR=b/D = 0.24$ ) อากาศถูกนำมาใช้เป็นของไหลทดสอบโดยแสดงในรูปของเลขเรย์โนลด์ในช่วง 4160 ถึง 25,400 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใส่แผ่นปีกสี่เหลี่ยมผืนผ้าในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงถึง 3.7 เท่า เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ ขณะที่ตัวประกอบเสียดทานมีค่าสูงถึง 21.8 เท่า แผ่นปีกที่มีสัดส่วนระยะพิชิตตามแนวการไหลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $PR$ ) ที่หรือมีระยะสั้นจะให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูง สมรรถนะเชิงความร้อนของการใส่แผ่นปีกในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 1.25–1.54 โดยค่าสูงสุดและเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือกรณี  $PR = 1.0$   
**คำหลัก:** แผ่นปีกสี่เหลี่ยมผืนผ้า, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, ตัวประกอบเสียดทาน, การไหลหมุนควง, สมรรถนะเชิงความร้อน

### Abstract

This article presents the influence of rectangular-winglet tape placed in a uniform heat-fluxed heat exchanger tube on heat transfer and flow resistance characteristics. In the current experiment, the rectangular-winglet tape with attack angle of  $30^\circ$  are inserted into the tube with four relative winglet-pitches ( $RP=P/D = 0.5, 1.0, 1.5$  and  $2.0$ ) at a single winglet blockage ratios ( $BR=b/D = 0.24$ ). Air as the test fluid flows through the tube for Reynolds number of about 4160–25,400. The experimental results reveal that the rectangular-winglet tape can considerably enhance the heat transfer rate up to 3.7 times above the smooth tube whereas the friction factor is up to 21.8 times. The decrease in  $PR$  leads to higher heat transfer and friction loss. The thermal enhancement factor of the rectangular-winglet tape is in the range of 1.25–1.54 where its maximum regarded as the optimum point is at  $PR = 1.0$ .

**Keywords:** Rectangular-winglet tape, Heat exchanger, Friction loss, Vortex generator, Thermal performance

### 1. บทนำ

ปัจจุบันมีการศึกษาเชิงทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอย่างกว้างขวาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงาน ลดขนาดและต้นทุนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หนึ่งใน

วิธีการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือวิธี Passive [1] ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากไม่จำเป็นต้องนำพลังงานภายนอกเข้ามาช่วย สามารถสร้างขึ้นได้เอง เช่น การเพิ่มพื้นผิว การติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (Turbulator device)

การติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน (Vortex generator, VG) เป็นต้น

การติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน (Turbulator device, TD) เช่น ลวดขด ใบพัด และการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน (Vortex generator, VG) เช่น ปีก (Winglet) ช่วยเพิ่มปรากฏการณ์การขนส่ง (Transport phenomena) ด้วยการพัฒนาระยะไหลวนตามแนวแกนการไหลรวมทั้งแนวขวางการไหล ทั้งยังสามารถเพิ่มระดับการผสมของของไหลอุณหภูมิสูงและต่ำได้เป็นอย่างดีส่งผลให้เกิดการขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Convective heat transfer coefficient)

กรณีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วน Eiamsa-ard et al. [2] ทำการศึกษาเชิงทดลองในห้องเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทรงกลมด้วยการติดตั้งใบพัดแบบวนระยะ ( $S = 1.0, 2.0$  และ  $3.0$ ) เปรียบเทียบกับใบพัดยาว ( $S = 0$ ) ที่มีค่าอัตราส่วนการบิด 2 ค่า ( $y = 6.0$  และ  $8.0$ ) จากการทดลองพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดพบที่การติดตั้งใบพัดยาว Promvong [3] ทำการเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการติดตั้งลวดขดสองชนิด (ลวดขดกลมและลวดขดจัตุรัส) การทดลองพบว่า การติดตั้งลวดขดทั้งสองชนิดให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าท่อผนังเรียบ โดยค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดพบที่กรณีติดตั้งลวดขดจัตุรัส Promvong and Eiamsa-ard [4] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในห้องกลด้วยการติดตั้งวงแหวนรูปกรวยร่วมกับใบพัดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ในช่วง 6000 ถึง 26,000 จากการศึกษาพบว่า การติดตั้งวงแหวนรูปกรวยร่วมกับใบพัดให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนสูงกว่าการติดตั้งวงแหวนรูปกรวยเพียงอย่างเดียวในช่วง 4-10% และ 4-8% ตามลำดับ Promvong [5] ทดลองการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการติดตั้งลวดขดร่วมกับใบพัดเพื่อสร้างการไหลปั่นป่วนจากการทดลองพบว่า การใช้อุปกรณ์ร่วมระหว่างลวดขดและใบพัดส่งผลให้ระดับการไหลปั่นป่วนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ลวดขดหรือใบพัดเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเท่ากับ 1.5

กรณีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวน Skullong et al. [6] ศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนในห้องกลโดยใช้แผ่นพรมติดปีกสี่เหลี่ยมแบบวางเอียงและเปรียบเทียบผลที่ได้กับแผ่นทึบ ผลการทดลองพบว่า แผ่นพรมติดปีกสี่เหลี่ยมแบบวางเอียงให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน

ร้อนสูงกว่าแผ่นทึบเนื่องจากมีค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำกว่า Skullong et al. [7] ทำการศึกษาเชิงทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลขของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แผ่นปีกสามเหลี่ยมภายในท่อ ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การใช้แผ่นปีกสามเหลี่ยมให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงถึง 1.49 โดยมีค่าสูงกว่าการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลปั่นป่วนชนิดใบพัดเกลียว วงแหวนผลลวดขด และใบพัดยาว 12%, 22% และ 28% ตามลำดับ Prasopsuk et al. [8] ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมด้วยการติดตั้งแผ่นปีกพรมที่มีการปรับเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 4 ค่า ( $d = 1.0, 1.5, 2.0$  และ  $3.0$  mm) พบว่า แผ่นปีกพรมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะขนาดเล็ก ( $d = 1.0$  mm) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะขนาดใหญ่ ( $d = 3.0$  mm) ในขณะที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนพบที่เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ  $2.0$  mm โดยมีค่าเท่ากับ 1.46 Skullong et al. [9] ทำการเพิ่มสมรรถนะให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยติดตั้งแผ่นพรมติดปีกสามเหลี่ยมจากการทดลองพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถสร้างการไหลหมุนวนตามแนวยาวซึ่งไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อน ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในแง่ของการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขชี้ให้เห็นว่าการติดตั้ง VG จะทำให้ของไหลผสมผสานกันได้ดีกว่าการติดตั้ง TD เนื่องจากแกนการหมุนของ VG แข็งแรงกว่า ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ พัฒนาอุปกรณ์ VG เพื่อใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลม โดยใช้แผ่นปีกสี่เหลี่ยมทำมุมปะทะ  $30^\circ$  สัดส่วนความสูงปีกต่อความสูงท่อค่าเดียว ( $b/D = BR = 0.24$ ) และสัดส่วนระยะพิชิตตามแนวการไหลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $P/D$ ) 4 ค่า คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เพื่อศึกษาอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบเสียดทานและสมรรถนะเชิงความร้อน

## 2. ทฤษฎีและการคำนวณ

การศึกษาเชิงทดลองสำหรับงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันในรูปของตัวประกอบเสียดทานรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบ (Working fluid) ซึ่งมีทฤษฎีและการคำนวณที่เกี่ยวข้องดังนี้

การวิเคราะห์และคำนวณการไหลของของไหลทดสอบ  
แสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ ดังแสดง  
ในสมการที่ (1)

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

ตัวประกอบเสียดทาน ( $f$ ) หาได้จาก

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

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่อากาศได้รับ ( $Q_{air}$ ) และการพาความร้อน ( $Q_{conv}$ ) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q_{air} = Q_{conv} \quad (3)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ( $h$ ) หาได้จาก

$$h = \frac{\dot{m} C_{p,a} (T_o - T_i)}{A(\bar{T}_s - T_b)} \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } T_b = (T_o + T_i)/2 \quad (5)$$

$$\text{และ } \bar{T}_w = \sum (T_{w1} + T_{w2} + \dots + T_{w24})/24 \quad (6)$$

เลขนัสเซิลต์เฉลี่ย ( $Nu$ ) หาได้ดังสมการต่อไปนี้

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

สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งแผ่นปีก ( $h$ ) กับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนผิวเรียบ ( $h_o$ ) ซึ่งคิดที่ค่ากำลังขับเดียวกัน จากเอกสารอ้างอิง [1-9] โดยแสดงได้ดังนี้

$$TEF = \frac{h}{h_o} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_o} \bigg|_{pp} = \left( \frac{Nu}{Nu_o} \right) \left( \frac{f}{f_o} \right)^{-1/3} \quad (8)$$

โดยที่

$A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยการพาของท่อทดสอบ

$C_{p,a}$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ

$L$  คือ ความยาวชุดทดสอบ

$\Delta P$  คือ ความดันตกคร่อมชุดทดสอบ

$V$  คือ ความเร็วเฉลี่ย

$T_b$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ย

$T_o$  คือ อุณหภูมิทางออก

$T_i$  คือ อุณหภูมิทางเข้า

$\bar{T}_w$  คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของท่อทดสอบ

$m$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

$\nu$  คือ ความหนืดเชิงจลน์ของของไหลทดสอบ

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของของไหลทดสอบ

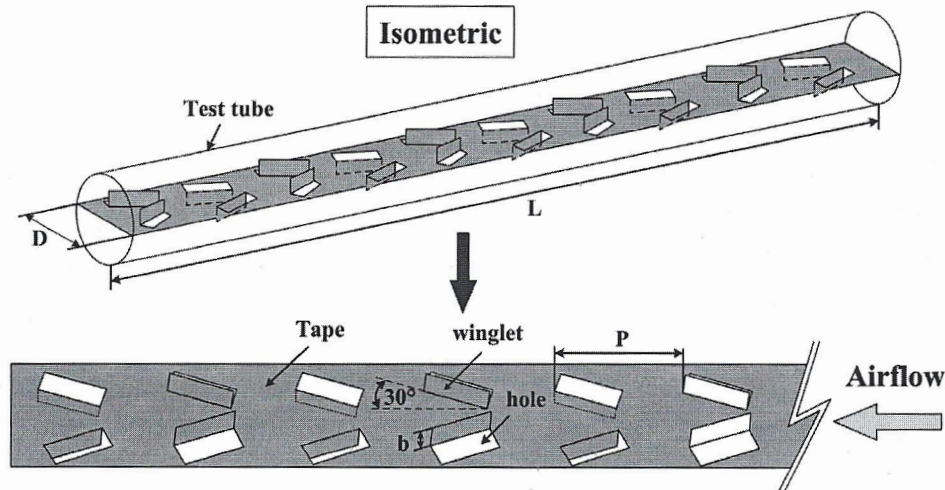
### 3. อุปกรณ์ การติดตั้ง และวิธีการทดลอง

#### 3.1 แผ่นปีกทดสอบ

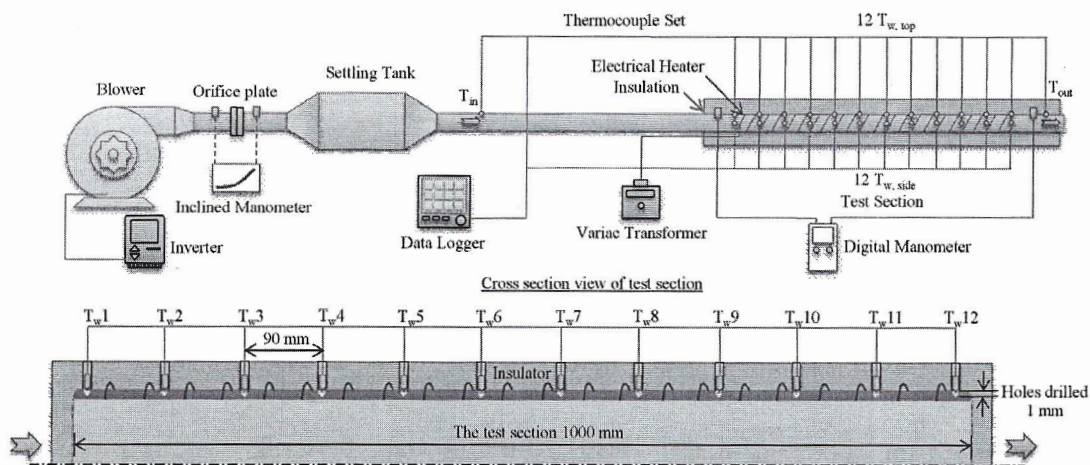
ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีลักษณะเป็นท่อกลมทรงกระบอกมีความยาวรวม 3000 mm ส่วนทดสอบยาว ( $L$ ) 1000 mm โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $D$ ) 50 mm แผ่นปีกที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง ( $W$ ) 50 mm มีความยาวเท่ากับ ความยาวส่วนทดสอบ ( $=L=1000$  mm) และหนา ( $t$ ) 0.8 mm แผ่นปีกถูกสร้างขึ้นจากแผ่นอะลูมิเนียมโดยการเจาะรูเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมแล้วขึ้นขึ้นดัดแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีมุมปะทะ  $30^\circ$  สัดส่วนความสูงปีกต่อความสูงท่อ ( $b/D$ ) เท่ากับ 0.24 และสัดส่วนระยะพิชิตตามแนวการไหลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ( $P/D$ ) 4 ค่า คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0

#### 3.2 ชุดทดลองและวิธีการ

อุปกรณ์ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 2 จากรูป อุปกรณ์ชุดทดลองประกอบด้วยพัดลมแรงดันสูงขนาด 2.0 kW ซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายของไหลทดสอบ (อากาศ) ผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice plate) ที่มีหน้าที่เป็นตัววัดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าส่วนทดสอบ โดยมีมานอมิเตอร์ชนิดเอียง (Inclined manometer) เป็นตัววัดค่าผลต่างของความดันโดยการอ่านค่าจากความแตกต่างของระดับน้ำ จากนั้นอากาศถูกส่งไปยังถังระเบียบการไหลของของไหล (Settling tank) แล้วเข้าสู่ช่องปรับสภาพการไหล (Calm section) ซึ่งเป็นตัวปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีลักษณะพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully developed flow) ก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบ (Test section) ขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electrical wire) ขนาด 2000 W ถูกนำมาพันรอบท่อทดสอบเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและมีการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศภายนอก การวัดอุณหภูมิผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด T (T-type thermocouple) จำนวน 24 ตัว ขณะที่อุณหภูมิทางเข้าและอุณหภูมิทางออกชุดทดสอบจะใช้เซ็นเซอร์ชนิด RTD (Resistance Temperature Detector) เป็นตัววัดค่า โดยอุณหภูมิทั้งหมดจากเทอร์โมคัปเปิลและเซ็นเซอร์จะส่งสัญญาณไปยังระบบจัดเก็บข้อมูล (Data acquisition system) รุ่น FLUKE 2680A และประมวลผลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบและพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์แผ่นปีกสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 2 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของพารามิเตอร์และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| Working fluid   | Air                |
| Reynolds number | 4160 to 25,400     |
| $b/D=BR$        | 0.24               |
| $P/D=PR$        | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 |
| Tape thickness  | 0.8 mm             |
| Tape length     | 1000 mm            |

#### 4. ผลการทดลอง

##### 4.1 การทดสอบท่อผิวเรียบ

ก่อนทำการติดตั้งอุปกรณ์ VG ในรูปแบบแผ่นปีกสี่เหลี่ยมภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องทดสอบท่อผิวเรียบเทียบกับสมการที่มีมาในอดีตก่อนเพื่อยืนยันความ

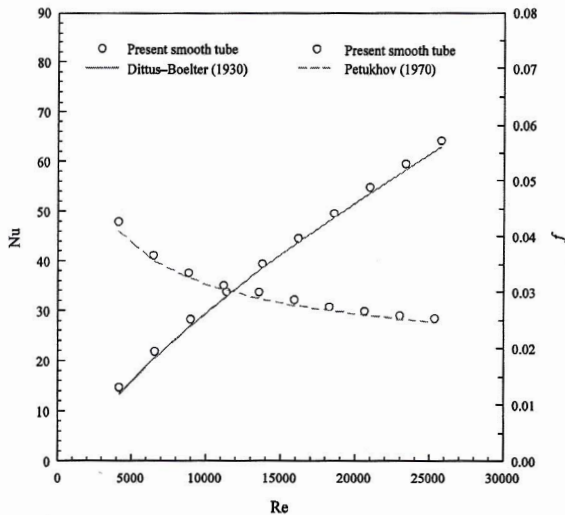
ถูกต้องของชุดทดสอบและผลการทดลอง โดยค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวแปรไร้มิติแสดงในเทอมของเลขนัสเซลท์ (Nusselt number,  $Nu$ ) ขณะที่ค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบแสดงในเทอมของตัวประกอบความเสียดทาน (friction factor,  $f$ ) ค่า  $Nu$  ที่ได้จากการทดสอบท่อผิวเรียบจะนำมาเปรียบเทียบกับสมการของ Dittus-Boelter (สมการที่ 9) ขณะที่ค่า  $f$  จะนำมาเปรียบเทียบกับสมการของ Petukhov (สมการที่ 10) จากเอกสารอ้างอิง [10] ซึ่งเป็นช่วงการไหลปั่นป่วนแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully developed turbulent flow)

สมการของ Dittus-Boelter

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

สมการของ Petukhov

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (10)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu และ  $f$  กับ Re กรณีท่อผิวเรียบ

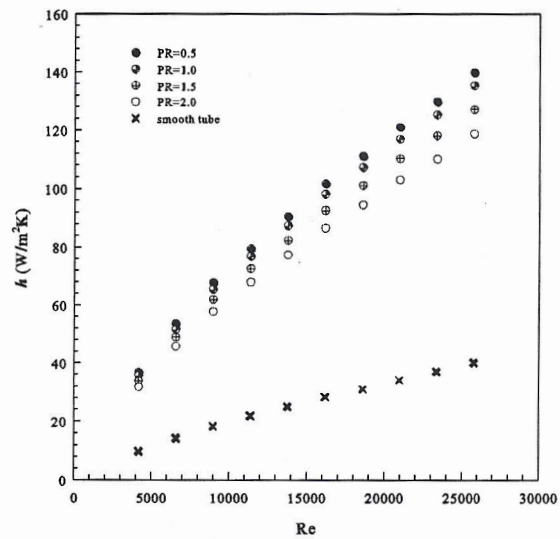
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu และ  $f$  จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ ผลการทดลองท่อผิวเรียบมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 5.2% สำหรับกรณี Nu และ 6.6% สำหรับกรณี  $f$  ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบชุดทดลองและผลการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำจึงสามารถดำเนินการทดสอบอุปกรณ์ VG ต่อไปได้

#### 4.2 การถ่ายเทความร้อน

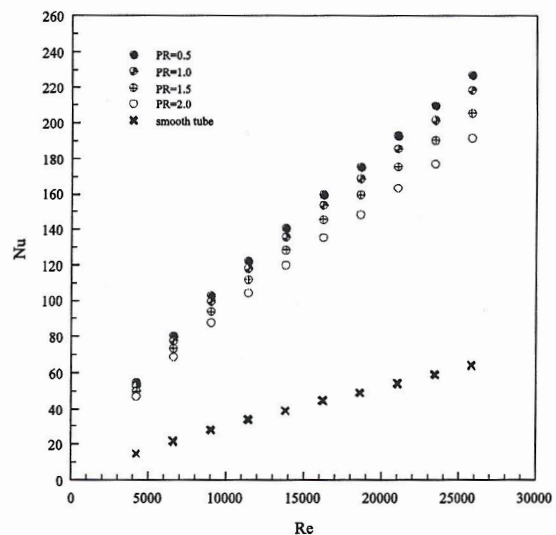
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient,  $h$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) แสดงดังรูปที่ 4 จากการทดลองพบว่าค่า  $h$  เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re โดยการติดตั้งแผ่นปีกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีระยะพิชชีถี่ (PR=0.5) ให้ค่า  $h$  สูงสุดตามด้วย PR=1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ ในขณะที่ท่อผิวเรียบมีค่า  $h$  ต่ำสุด เนื่องจากแผ่นปีกที่มีระยะพิชชีถี่จะส่งผลให้เกิดการไหลหมุนควงตามแนวยาว (longitudinal vortex generator) ที่ขึ้นและช่วยในการขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อนภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเกิดการผสมระหว่างของไหลอุณหภูมิต่ำและของไหลอุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี

ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re แสดงดังรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวแปรไร้มิติ (Nu) พบว่า การติดตั้งแผ่นปีกให้ค่า Nu สูงกว่าท่อผิวเรียบถึง 72.97%, 72.1%, 70.45% และ 68.55% สำหรับกรณี PR=0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ

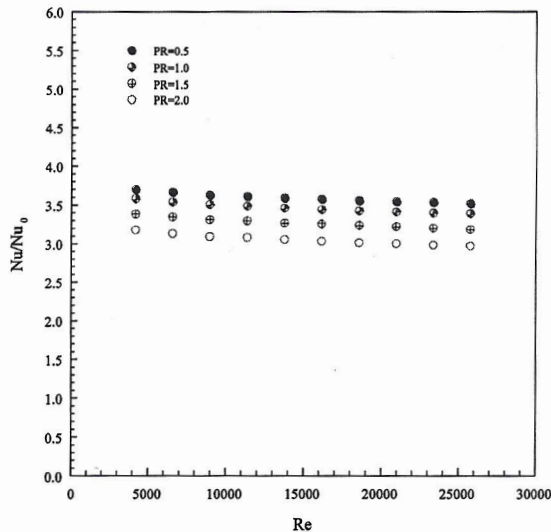
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กรณีติดตั้งแผ่นปีกต่อเลขนัสเซิลท์ของท่อผิวเรียบ ( $Nu/Nu_0$ ) กับ Re ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงค่า  $Nu/Nu_0$  ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น การติดตั้งปีกภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยการติดตั้งแผ่นปีกที่ PR=0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มีค่า  $Nu/Nu_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 3.6, 3.47, 3.27 และ 3.06 ตามลำดับ การติดตั้งแผ่นปีกที่ PR=0.5 ให้ค่า  $Nu/Nu_0$  เฉลี่ยสูงกว่าการติดตั้งปีกที่ PR=1.0, 1.5 และ 2.0 เท่ากับ 3.5%, 9% และ 15% ตามลำดับ



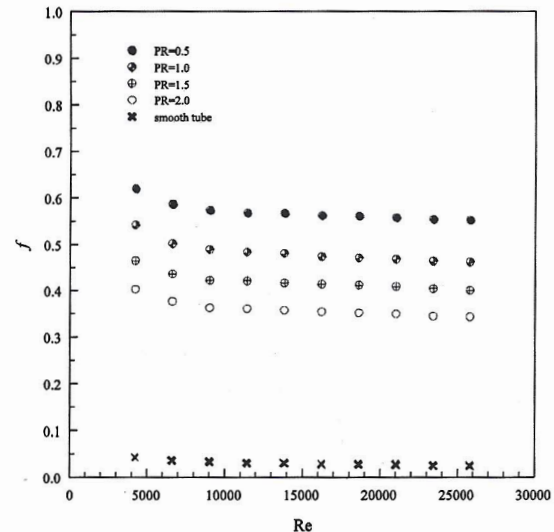
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $h$  กับ Re



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $Nu/Nu_0$  กับ  $Re$

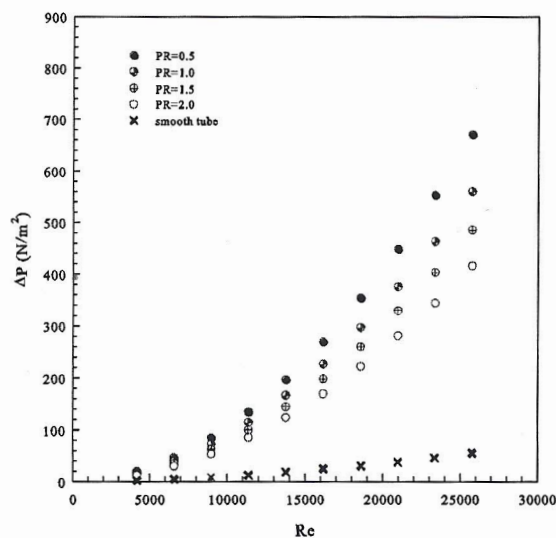


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Re$

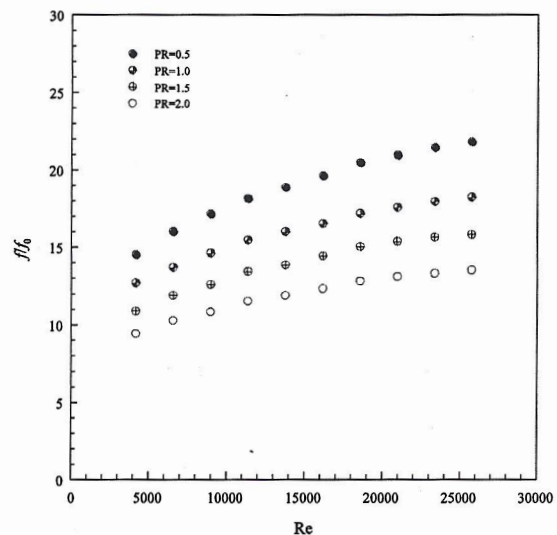
#### 4.3 ความดันตกคร่อมและความเสียดทาน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop,  $\Delta P$ ) ส่วนทดสอบกับ  $Re$  แสดงดังรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่า เมื่อค่าการไหลของสารทำงานในรูปของ  $Re$  เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\Delta P$  เพิ่มขึ้นตาม โดยการติดตั้งแผ่นปีกที่มีระยะพิตซ์ (PR=0.5) จะไปรบกวนการไหลของของไหลทำให้มีระดับความปั่นป่วนสูงกว่ากรณีแผ่นปีกที่มีระยะพิตซ์ห่าง

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $f$  กับ  $Re$  จากรูปเห็นได้ชัดว่าการติดตั้งปีกภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ค่า  $f$  เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อผิวเรียบซึ่งสอดคล้องกับค่า  $Nu$  โดยการติดตั้งปีกให้ค่า  $f$  สูงกว่าท่อผิวเรียบ 21.8, 18.3, 15.8 และ 13.5 เท่า สำหรับกรณี PR=0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P$  กับ  $Re$



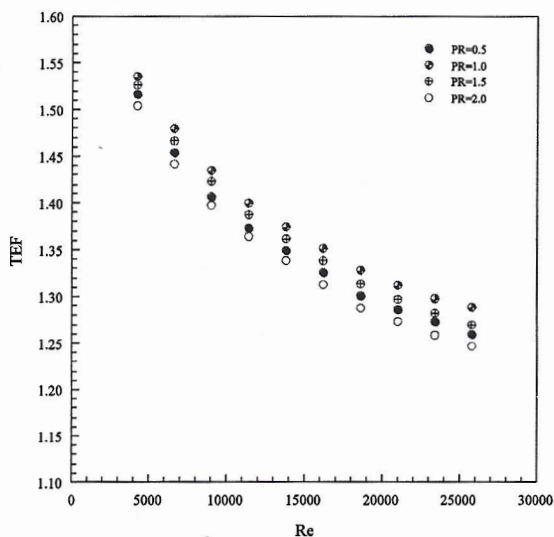
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $f/f_0$  กับ  $Re$

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีติดตั้งปีกต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อผิวเรียบ ( $f/f_0$ ) กับ  $Re$  ผลการทดลองพบว่า  $f/f_0$  มีค่าอยู่ในช่วง 14.5–21.8, 12.7–18.2, 10.9–15.8 และ 9.4–13.5 สำหรับ PR=0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ การติดตั้งปีกที่ PR=0.5 มีค่า  $f/f_0$  เฉลี่ยสูงกว่าการติดตั้งปีกที่ PR=1.0, 1.5 และ 2.0 เท่ากับ 15.2%, 26.4% และ 36.9%

#### 4.4 สมรรถนะเชิงความร้อน

เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีติดตั้งแผ่นปีก ค่าสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) ได้ถูกกำหนดขึ้นซึ่งมีนิยามดังแสดงในสมการที่ (8) ความสัมพันธ์ระหว่าง TEF กับ  $Re$  แสดงดังรูปที่ 10 จากการทดลองพบว่า

ค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น โดย TEF มีค่าอยู่ในช่วง 1.26–1.52, 1.29–1.54, 1.27–1.53 และ 1.25–1.5 สำหรับ PR=0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ การติดตั้งแผ่นปีกที่ PR=1.0 ให้ค่า TEF สูงสุดสำหรับกรณีทดสอบนี้ โดยมีค่าเท่ากับ 1.54 ที่ค่า Re=4160 และมีค่าสูงกว่าการติดตั้งปีกที่ PR=1.5, 0.5 และ 2.0 เท่ากับ 1.2%, 2.2% และ 3.2% ตามลำดับ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง TEF กับ Re

##### 5. สรุปผลการทดลอง

การทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลมด้วยการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนตามแนวยาวชนิดแผ่นปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนระยะพิชิตปีกค่าต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

➢ การติดตั้งแผ่นปีกภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าสูงกว่าท่อผิวเรียบ 68.55-72.97%

➢ ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงสุดสำหรับกรณีทดสอบนี้พบที่การติดตั้งแผ่นปีกที่ PR=0.5 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.7 และ 21.8 สำหรับ  $Nu/Nu_0$  และ  $f/f_0$  ตามลำดับ

➢ สมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) สูงสุดในกรณีทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.54 โดยพบที่การติดตั้งแผ่นปีกที่ PR=1.0 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการติดตั้งปีกที่ PR=1.5, 0.5 และ 2.0 เท่ากับ 1.2%, 2.2% และ 3.2% ตามลำดับ

➢ การเลือกใช้ตัวสร้างการไหลหมุนวนตามแนวยาวชนิดแผ่นปีกรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบ่งเป็น 2 กรณี คือ (1) หากต้องการให้อุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงควรเลือกใช้ที่ PR=0.5 เนื่องจากใช้ค่า Nu สูงสุด (2)

กรณีต้องการประหยัดพลังงานและเพิ่มค่าสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนควรเลือกใช้ที่ PR=1.0 เนื่องจากใช้ค่า TEF สูงสุด

##### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Liu, S., Sakr, M. (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 64–81.
- [2] Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., Promvonge, P. (2006). Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 33, pp. 1225–1233.
- [3] Promvonge, P. (2008). Thermal performance in circular tube fitted with coiled square wires, *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 980–987.
- [4] Promvonge, P., Eiamsa-ard, S. (2007). Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 34, pp. 849–859.
- [5] Promvonge, P. (2008). Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators, *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 2949–2955.
- [6] Skullong, S., Promvonge, P., Thianpong, C., Pimsarn, M. (2016). Heat transfer and turbulent flow friction in a round tube with staggered-winglet perforated-tapes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 95, pp. 230–242.
- [7] Skullong, S., Promvonge, P., Jayranaiwachira, N., Thianpong, C. (2016). Experimental and numerical heat transfer investigation in a tubular heat exchanger with delta-wing tape inserts, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 109, pp. 164–177.
- [8] Prasopsuk, C., Chingtuaythong, W., Khanokniyakarn, C., Skullong, S. and Promvonge, P. (2016). Performance assessment in a heat exchanger tube fitted with perforated-rectangular-winglet tape inserts, paper presented in the 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 13-16 December 2016, Chiang Mai Thailand.

- [9] Skullong, S., Promvong, P., Thianpong, C., Jayranaiwachira, N. (2017). Thermal behaviors in a round tube equipped with quadruple perforated-delta-winglet pairs, *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, pp. 229–243.
- [10] Incropera, F., Dewitt, P.D. (2006). *Introduction to Heat Transfer*, 5th edition, John Wiley & Sons Inc.