

# การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่แผ่นบิด

## Heat Transfer Enhancement in a Heat Exchanger with Twisted Tape Inserts

กิตติศักดิ์ ยงศิริ และ ภูวนาส สัมเกลี้ยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

E-mail: kittisak@mut.ac.th

Manuscript received January 10, 2013

Revised May 5, 2013

### บทคัดย่อ

การใส่แผ่นบิดได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเสมือนเป็นเครื่องกำเนิดการไหลหมุนควงสำหรับการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในบทความนี้ได้กล่าวถึงอิทธิพลของรูปร่างแผ่นบิดต่อการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียดทาน และตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนในช่วงการไหลราบเรียบและปั่นป่วน โดยทั่วไปการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนจะมีค่าสูงในช่วงการไหลราบเรียบกว่าในช่วงการไหลปั่นป่วน

### ABSTRACT

*Twisted tape inserts are widely applied as swirl generators for heat transfer enhancement in heat exchangers. In this paper, the effects of the twisted tape geometry on heat transfer rate, friction factor and thermal performance in both of laminar and turbulent regimes are described. In general, heat transfer enhancement and thermal performance factor in laminar flow are higher than those in turbulent flow.*

**Keywords:** Heat Transfer, Twisted Tape Inserts

### 1. บทนำ

ปัจจุบันหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนทั้ง

ภายในประเทศและทั่วโลกได้ตระหนักถึงความสำคัญในการประหยัดและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อันเนื่องมาจากปริมาณทรัพยากรธรรมชาติที่ลดน้อยลง ส่งผลกระทบและปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากการใช้พลังงาน เช่น ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มลพิษ ภาวะโลกร้อน เป็นต้น ดังนั้นแนวทางที่สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ก็คือการให้ความสนใจด้านพลังงานและการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาช่วยเพื่อดึงพลังงานมาใช้อย่างคุ้มค่าและเกิดประโยชน์แก่ผู้ใช่มากที่สุด

ในภาคอุตสาหกรรมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในกระบวนการผลิตต่าง ๆ เช่น การระบายความร้อน เครื่องทำความเย็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ฉะนั้นการออกแบบอุปกรณ์หรือระบบที่มีการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น สามารถทำงานได้ตามความต้องการ ราคาถูก สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูง โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด อายุการใช้งานที่ยาวนาน มีการบำรุงรักษาซ่อมแซมน้อย รวมทั้งมีความน่าเชื่อถือและปลอดภัยสูง

ปัจจุบันได้มีการออกแบบและปรับปรุงวิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นมากมายเพื่อช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การใช้แผ่นบิดเป็นหนึ่งในเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ สะดวกต่อการ

ติดตั้งและการบำรุงรักษาน้อย โดยทั่วไปแผ่นบีดจะทำหน้าที่เสมือนเป็นเครื่องกำเนิดการไหลหมุนควงอย่างต่อเนื่อง การไหลหมุนควงจะทำให้เกิดความปั่นป่วนใกล้ผนังท่อและช่วงเวลาในการไหลของของไหลภายในท่อให้นานขึ้น ทำให้ของไหลผสมกันและแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น การออกแบบรูปร่างของแผ่นบีดที่เหมาะสมของแผ่นบีดจะช่วยให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นขณะที่ความดันที่สูญเสียมีการลดลงอย่างเหมาะสมซึ่งจะทำให้มีผลต่อการประหยัดการใช้พลังงาน

## 2. วิธีการถ่ายเทความร้อน

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสามารถที่แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

### 2.1 วิธี Active

เป็นวิธีการใช้พลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยในกระบวนการ อันได้แก่ การใช้อุปกรณ์ทางกล อุปกรณ์ทางไฟฟ้า การสั่น การหมุน การไหลที่ทางเข้า และการใช้สนามแม่เหล็ก

### 2.2 วิธี Passive

เป็นวิธีการที่ไม่ต้องนำพลังงานจากภายนอกเข้ามาช่วยกระตุ้น อันได้แก่ การใช้พื้นผิวที่ได้รับการปรับสภาพแล้ว การใช้พื้นผิวหยาบ การเพิ่มพื้นผิว การใช้ขดลวด การปรับปรุงของไหลหรือสารทำงาน และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลแบบหมุนควงและปั่นป่วน ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น

### 2.3 วิธีผสม

เป็นการนำเทคนิค Active และ Passive เข้าใช้ร่วมกัน ซึ่งวิธีการนี้จะมีความยุ่งยากในการออกแบบ และถูกจำกัดการใช้งาน

## 3. ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนหลัก ๆ ประกอบด้วย เลขนัสเซลท์ ตัวประกอบความเสียดทาน ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน และอัตราส่วนการบีดของแผ่นบีด ซึ่งรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 1 การใส่แผ่นบีดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ

### 3.1 เลขนัสเซลท์

เลขนัสเซลท์เป็นตัวแปรไร้หน่วยในการบ่งบอกถึงศักยภาพการถ่ายเทความร้อนโดยเขียนในเทอมของ

$$Nu = hD/k \quad (1)$$

ค่า  $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และ  $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของไหล

### 3.2 ตัวประกอบความเสียดทาน

ตัวประกอบความเสียดทานเป็นตัวแปรไร้หน่วยในการบ่งบอกถึงการสูญเสียความดันในระบบ

$$f = \Delta P / ((L/D)(\rho u_f^2/2)) \quad (2)$$

โดยที่  $\Delta P$  คือ ค่าความดันตกคร่อมในท่อทดสอบ พิจารณาจากความแตกต่างจากระดับของเหลวในมาโนมิเตอร์

### 3.3 ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน

การพิจารณาตัวประกอบสมรรถนะความร้อนจะทำการพิจารณาที่สภาวะกำลังขับปั๊มเดียวกัน

$$(\dot{V}\Delta P)_o = (\dot{V}\Delta P) \quad (3)$$

เมื่อ  $\dot{V}$  อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลและเขียนในพจน์ตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ส์ ได้เป็น

$$(fRe^3)_o = (fRe^3)$$

$$Re_o = Re(ff_o)^{1/3}$$

ตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน คือ อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อทดสอบที่มีการปรับปรุง ( $h$ ) เทียบกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อเปล่า ( $h_o$ ) ที่กำลังขับปั๊มเดียวกัน

$$\eta = \frac{h}{h_o} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_o} \bigg|_{pp} = \left( \frac{Nu}{Nu_o} \right) \left( \frac{f}{f_o} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

ตัวประกอบสมรรถนะความร้อนจะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยเมื่อให้ค่า  $\eta > 1$  แสดงว่าให้มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อเปล่า โดยการพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์ที่ทำให้ค่าสมรรถนะความร้อนสูงที่สุด ซึ่งจะเป็นผลให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและประหยัดพลังงานที่ต้องป้อนให้กับระบบ นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เกิดประโยชน์ทั้งในแง่การลดพื้นที่การติดตั้ง ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ด้วยราคาขายที่ต่ำลง ลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการช่วยแก้ปัญหาวิกฤติทางทรัพยากรพลังงาน

### 3.4 อัตราส่วนการบิด

อัตราส่วนความยาวการบิดจะมีผลต่อลักษณะการไหลของของไหล โดยที่อัตราส่วนการบิดที่ต่ำจะมีเกลียวบิดที่ละเอียดทำให้ของไหลเกิดการไหลหมุนวนที่มากยิ่งขึ้น ซึ่งช่วยในการหมุนวนการ

ไหลของไหลในท่อให้ยาวนานยิ่งขึ้นนำไปสู่การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น

$$Y = y/W \quad (5)$$

### 4. แผ่นบิด

การใส่แผ่นบิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหนึ่งในเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่นิยมมากที่สุดเนื่องจาก มีต้นทุนต่ำ สะดวกต่อการติดตั้งและการบำรุงรักษา โดยทั่วไปแผ่นบิดจะทำหน้าที่เสมือนเป็นเครื่องกำเนิดการไหลหมุนวนอย่างต่อเนื่อง การไหลหมุนวนจะทำให้เกิดความปั่นป่วนใกล้ผนังท่อและช่วงเวลาในการไหลของของไหลภายในท่อให้นานขึ้น ทำให้ของไหลผสมกันและแลกเปลี่ยนความร้อนดียิ่งขึ้น การออกแบบรูปร่างของแผ่นบิดที่เหมาะสมของแผ่นบิดจะช่วยให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นขณะที่ความดันที่สูญเสียมีการลดลงอย่างเหมาะสมซึ่งจะทำให้มีผลต่อการประหยัดการใช้พลังงาน



ภาพด้านหน้า

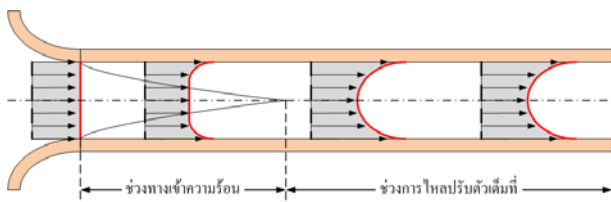
ภาพมุมสามมิติ

รูปที่ 2 แผ่นบิดแบบดั้งเดิม

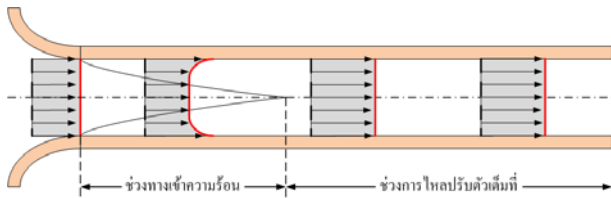
### 5. หลักการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นบิด

โดยทั่วไปการไหลในท่อที่มีความร้อนบริเวณผนังท่อจะมีพฤติกรรมดังรูปที่ 3(ก) ซึ่งเมื่อมีการไหลที่การปรับตัวเต็มที่แล้วชั้นขีดผิวความร้อนจะมีความหนาที่ค่าอุณหภูมิสูงบริเวณผนังท่อและมีอุณหภูมิที่ต่ำบริเวณแกนกลางท่อ ทั้งนี้การใส่แผ่นบิดในท่อจะเป็นการสร้างการไหลหมุนวนของของไหลภายในท่อโดยจะช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับระบบได้ เนื่องจากการไหลแบบหมุนวนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เกิดการผสมกันดียิ่งขึ้น

ทั้งหน้าตัดการไหล เพิ่มความปั่นป่วนของของไหลบริเวณที่ผนังท่อและแนวการไหลในท่อยาวนานขึ้น เพื่อให้ของไหลมีการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอใกล้เคียงกันทั้งหน้าตัดท่อระหว่างผนังและแกนกลางท่อดังแสดงในรูปที่ 3(ข) การหมุนควงที่เกิดขึ้น โดยการใช้แผ่นบิดมีผลที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้การสูญเสียพลังงานในรูปของความดันตกคร่อมจึงได้มีค่าสูงขึ้นตาม



(ก) ชั้นขีดผิวความร้อนของท่อเปล่า



(ข) ชั้นขีดผิวความร้อนของท่อที่มีการใส่แผ่นบิด

**รูปที่ 3** การก่อตัวของชั้นขอบเขตทางความร้อนในท่อกลมตามหลักการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

## 6. งานศึกษาที่ผ่านมา

จากงานศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงรูปร่างของแผ่นบิดสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นได้ ที่ผ่านมามีการตีพิมพ์บทความจำนวนมากทั้งนี้ในบทความฉบับนี้จะเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมาในช่วง 10 ปี โดยแบ่งผลของการศึกษาจะออกเป็น 2 ช่วงการไหล คือ ช่วงการไหลแบบราบเรียบ และช่วงการไหลปั่นป่วน

### 6.1 ช่วงการไหลราบเรียบ

Chamra และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมภายในท่อที่มีครีบน้ำขนาดเล็กที่มีการใส่แผ่นบิด จากการศึกษาพบว่าท่อที่มีครีบน้ำขนาดเล็กที่มีการใส่และไม่ใส่แผ่นบิด จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ท่อที่มีการใส่แผ่นบิดจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นกว่าท่อที่ไม่มีการสอดใส่แผ่นบิด

Jaisankar และคณะ [2] ทำการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานของเครื่องทำน้ำอุ่นพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยการใส่แผ่นบิดเกลียวที่มีทิศทางการหมุนของเกลียวที่แตกต่างกัน (ซ้าย-ขวา) โดยการบิดเกลียวจะมีทั้งที่บิดเกลียวตลอดความยาวแผ่นและเว้นระยะการบิดเกลียว ทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบราบเรียบในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 200 ถึง 1600

ในปีถัดมา Eiamsa-ard และคณะ [3] ศึกษาอิทธิพลของการใส่แผ่นบิดแบบคดขบค่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อน โดยได้ทำการศึกษาทั้งช่วงการไหลแบบราบเรียบและการไหลปั่นป่วน ซึ่งแผ่นบิดแบบคดขบสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนได้ทั้งในช่วงการไหลแบบราบเรียบและการไหลปั่นป่วน โดยเฉพาะในช่วงการไหลแบบราบเรียบแผ่นบิดแบบคดขบสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูงถึง 12.8 เท่า และมีสมรรถนะทางความร้อนสูงถึง 4.88 เท่าของท่อเปล่า

Liu และคณะ [4] ทำการใช้การโปรแกรมการคำนวณทางกลศาสตร์ของไหลพลวัต (CFD) ในศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานในช่วงการไหลแบบราบเรียบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 500 ถึง 1750 โดยมีการใช้แผ่นบิดที่มีช่องว่างบริเวณกลางแผ่น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบความเสียดทานลดลงและตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนเพิ่มขึ้น ประมาณ 7% ถึง 20% เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นบิดแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 1 งานศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการใช้แผ่นบิดที่ช่วงการไหลราบเรียบ

| ผู้แต่ง               | รูปแบบแผ่นบิด                                                                     | ของไหลทดสอบ | เลขเรย์โนลด์ส์ | $Nu/Nu_0$ | $f/f_0$   | $\eta$  |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------|-----------|-----------|---------|
| Wongcharee และคณะ [5] |  | น้ำ         | 830-1990       | 6.0-12.0  | 8.0-14.0  | 3.0-5.0 |
| Eiamsa-ard และคณะ [3] |  | น้ำ         | 1000-2200      | 9.0-12.8  | 16.0-18.0 | 3.5-4.8 |

Wongcharee and Eiamsa-ard [5] ได้เสนอผลการทดลอง คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในช่วงการไหลแบบราบเรียบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 830 ถึง 1990 โดยการใช้แผ่นบิดแบบสลับแกนการไหล จากผลการศึกษาพบว่าแผ่นบิดแบบสลับแกนสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนให้สูงขึ้นได้ อันเนื่องมาจากการสลับแกนของแผ่นบิดจะตัดกระแสของของไหลให้แยกออกจากกระแสการไหลหลัก ทำให้เกิดการผสมกันดียิ่งขึ้นซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนถึง 6 เท่า และสมรรถนะทางความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 3 ถึง 5 เท่าของท่อเปล่า

จากงานวิจัยที่ผ่านมาหลายๆท่าน พบได้ว่าการใช้แผ่นบิดในช่วงการไหลราบเรียบจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงมากทั้งนี้มีการสูญเสียความดันตกคร่อมที่ไม่สูงมากนักอันเนื่องมาจากการไหลในช่วงราบเรียบที่มีความเร็วต่ำมาก แต่ทว่ากลับมีชั้นขีดผิวความร้อนที่ค่อนข้างหนากว่าช่วงการไหลปั่นป่วนมากนัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม การไหลโดยเฉพาะผนังท่อจึงทำให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงดังในตารางที่ 1 ได้เสนอผลงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่าแผ่นบิดที่ใช้สามารถช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 13 เท่า ทั้งนี้ได้ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดถึง 5 เท่า ของท่อที่ไม่มีการใส่แผ่นบิด

## 6.2 ช่วงการไหลปั่นป่วน

Sivashanmugam and Suresh [6] ทำการศึกษาแผ่นเกลียวสกรู (Helical screw tape) ที่มีความยาวของแผ่นเกลียวสกรูยาวตลอดทั้ง

ความยาวของแผ่นและมีการเว้นระยะของแผ่นเกลียวสกรูเป็นระยะ การออกแบบการเว้นระยะของแผ่นเกลียวสกรูเพื่อจะช่วยลดค่าตัวประกอบความเสียดทานที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าการเว้นระยะของแผ่นเกลียวสกรูที่น้อยที่สุด ทำให้ตัวประกอบความเสียดทานลดลงประมาณ 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเกลียวสกรูที่มีความยาวทั้งแผ่น

ในปีเดียวกัน Chang และคณะ [7] ทำการศึกษาแผ่นบิดที่มีครีบลางขอบแผ่น (Serrated twisted tape) ผลการศึกษาพบว่าแผ่นบิดที่มีครีบลางขอบแผ่นสามารถสร้างความปั่นป่วนและทำให้ของไหลบริเวณผนังท่อผสมกันดียิ่งขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นบิดแบบดั้งเดิม

ในปีถัดมา Promvong [8] ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นบิดที่เป็นตัวสร้างการไหลหมุนควงร่วมกับขดลวดที่เป็นตัวสร้างความปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส การศึกษาจะมีการสอดใส่ขดลวดอยู่ภายในท่อทดลองในขณะที่แผ่นบิดถูกใส่อยู่ภายนอกขดลวด การทดสอบใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 3000 ถึง 18,000 ผลการทดสอบพบว่าการใช้แผ่นบิดร่วมด้วยกับขดลวดช่วยเพิ่มความปั่นป่วนและการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นบริเวณผิวท่อทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า

ในปี 2009 Thianpong และคณะ [9] ได้ทำการทดสอบผลกระทบของแผ่นบิดที่สร้างการไหลหมุนควงต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อผิวขรุขระที่มีอัตราส่วนพิชท์ที่แตกต่างกันและมีอัตราส่วนการบิดของแผ่นบิด 3

อัตราส่วน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ท่อผิวขรุขระและแผ่นบีดร่วมกัน ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายมีการเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนพิทช์และลดลงตามอัตราส่วนการบีด

Rahimi และคณะ [10] ทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนรูปทรงของแผ่นบีดในลักษณะที่ต่างกัน คือ แผ่นบีดดั้งเดิม แผ่นบีดที่มีการเจาะรูกลมกลางแผ่น แผ่นบีดที่มีการตัดขอบ และแผ่นบีดที่มีการตัดขอบปิก ผลการศึกษาพบว่าแผ่นบีดที่มีการปรับเปลี่ยนรูปทรงในลักษณะตัดขอบ สามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนให้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นบีดแบบดั้งเดิม

Murugesan และคณะ [11] ทำการศึกษาแผ่นบีดที่มีการตัดขอบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Square-cut) แผ่นบีดที่ใช้ทดสอบมีอัตราส่วนบีดสามค่าและใช้น้ำเป็นของไหลในการทดสอบ โดยทำการทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 2000 ถึง 12,000 ในปีเดียวกัน Eiamsa-ard และคณะ [12] ศึกษาอิทธิพลของแผ่นบีดที่มีการตัดเป็นรูปปีกที่ขอบแผ่น (Delta-winglet) ต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ทำการทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 3000 ถึง 27,000 ผลการทดสอบพบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบีด อัตราส่วนตัดปีก ต่อมา Eiamsa-ard และคณะ [13] ทำการศึกษาแผ่นบีดใบเดี่ยว (ST) แผ่นบีดคู่ที่มีทิศทางการบีดของเกลียวในทิศทางเดียวกัน (CT) และแผ่นบีดคู่ที่มีทิศทางการบีดของเกลียวต่างกัน (CoT) ผลการทดสอบพบว่า แผ่นบีดคู่ที่มีทิศทางการบีดของเกลียวต่างกันมีอัตราค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นบีดคู่ที่มีทิศทางการบีดของเกลียวในทิศทางเดียวกัน และแผ่นบีดใบเดี่ยวประมาณ 12.5 ถึง 44.5% และ 17.8 ถึง 50% ตามลำดับ

Eiamsa-ard [14] ทำการศึกษาอิทธิพลของแผ่นบีดที่เป็นตัวสร้างการไหลหมุนวนภายในท่อสี่เหลี่ยมต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหาย การทดลองใช้แผ่นบีดมาวางตามรางอากาศจำนวนหลายแถวที่ระยะบีดต่าง ๆ การทดสอบใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบ ทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ระหว่าง 2700 ถึง 9000 ผลการทดสอบพบว่า การใส่แผ่นบีดนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอัตราค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อเปล่าประมาณ 10.3-169.5%

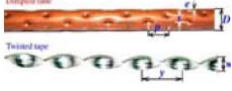
Murugesan และคณะ [15] นำเสนอผลการศึกษารูปทรงของแผ่นที่มีการตัดขอบเป็นรูปตัววี (V-cut) โดยที่มีการปรับความลึกและความกว้างของการตัดที่แตกต่างกันออกไป ในการศึกษาได้ใช้น้ำเป็นของไหลในการทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 3000 ถึง 11,000 ผลการทดสอบพบว่า การถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียหายเพิ่มสูงขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนการบีด อัตราส่วนความลึกและความกว้าง

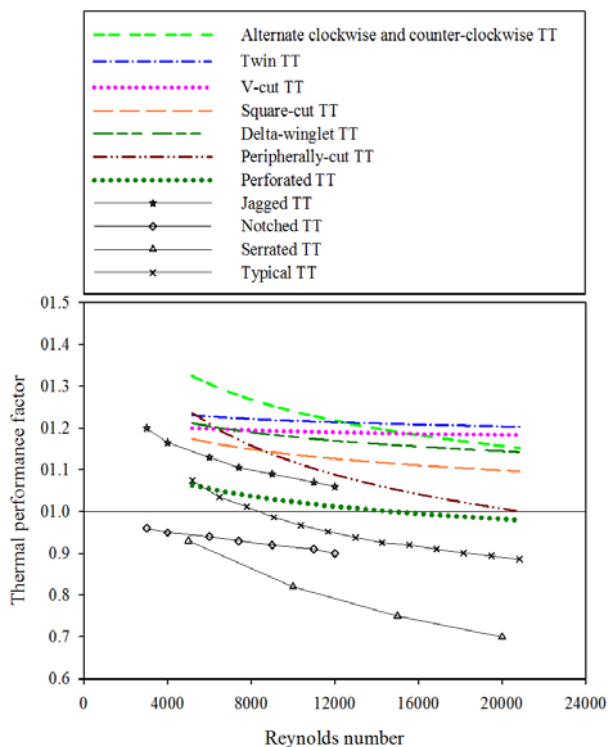
Eiamsa-ard และคณะ [16] ทำการศึกษาแผ่นบีดแบบตัดขอบร่วมด้วยการเจาะรูบริเวณกลางของแผ่นบีดเพื่อเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนและลดการสูญเสียความดันภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ทำการทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 5500 ถึง 20,500 ใช้น้ำเป็นของไหลในการทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า การตัดขอบร่วมด้วยการเจาะรูบริเวณกลางของแผ่นบีดสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นแต่ค่าความเสียหายก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

Thianpong และคณะ [17] ทำการศึกษาอิทธิพลของการใส่แผ่นบีดที่มีการเจาะรูที่ขอบแผ่น (Perforated twisted-tape) ต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ตัวประกอบความเสียหาย และตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการให้ความร้อนคงที่ผนัง ในการศึกษาได้ใช้น้ำเป็นของไหลในการทดสอบที่ช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ตั้งแต่ 4000 ถึง 20,000 แผ่นบีดที่ใช้ทดสอบมีอัตราส่วนบีด เส้นผ่านศูนย์กลางรูและระยะห่างระหว่างรูที่แตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นบีดแบบเจาะรูมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการสอดใส่แผ่นบีดแบบดั้งเดิมประมาณ 27.4%

จากงานศึกษาที่ผ่านมาจะพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการศึกษาที่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากโดยส่วนใหญ่การใช้งานแผ่นบีดจะมีการใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในภาคอุตสาหกรรมที่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ในส่วนของช่วงการไหลราบเรียบนั้นก็ได้มีการใช้บ้างบางกรณีแต่ค่อนข้างจะน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงการไหลปั่นป่วน จากงานศึกษาที่ผ่านมาที่ช่วงการไหลปั่นป่วนในเบื้องต้นสามารถสรุปรายละเอียดผลการศึกษาดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 งานศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยใช้แผ่นบิดในช่วงการไหลปั่นป่วน

| ผู้แต่ง                  | รูปแบบแผ่นบิด                                                                       | ของไหลทดสอบ | เลขเรย์โนลด์ส์ | $Nu/Nu_0$ | $f/f_0$   | $\eta$      |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------|-----------|-----------|-------------|
| Thianpong และคณะ [9]     |    | น้ำ         | 12000-44,000   | 1.66-3.03 | 5.00-6.31 | -           |
| Promvonge [8]            |    | อากาศ       | 3000- 18,000   | 4.50-6.50 | 68.0-80.0 | 1.00-2.00   |
| Eiamsa-ard [14]          |    | อากาศ       | 2700-9000      | -         | 1.45-5.70 | 0.94-1.40   |
| Rahimi และคณะ [10]       |    | น้ำ         | 2950-11,800    | 2.49-1.96 | 8.70-6.50 | 1.05-1.25   |
| Eiamsa-ard และคณะ [16]   |    | น้ำ         | 5500-20,500    | 2.00-3.00 | 1.20-1.30 | 1.10 – 1.40 |
| Sivashanmugam และคณะ [6] |   | น้ำ         | 1000–10,000    | 1.95-4.89 | 3.91-4.89 | -           |
| Chang และคณะ [7]         |  | น้ำ         | 5000–25,000    | 3.8-6.0   | 1.25-1.67 | 0.9-0.65    |
| Murugesan และคณะ [15]    |  | น้ำ         | 3000-11,000    | 3.17–1.79 | 26.7–10.3 | 1.18–1.02   |
| Eiamsa-ard และคณะ [12]   |  | น้ำ         | 3000-27000     | 2.50-1.30 | 35.3-10.8 | 1.22-0.85   |
| Thianpong และคณะ [17]    |  | น้ำ         | 4000-20,000    | 1.80-1.95 | 6.00-6.50 | 1.00-1.07   |
| Murugesan และคณะ [11]    |  | น้ำ         | 2000-12,000    | 1.92–1.49 | 5.20–2.50 | 1.20 – 1.09 |
| Eiamsa-ard และคณะ [13]   |  | น้ำ         | 3700–21,000    | 2.07-1.22 | 26.6-11.2 | 1.1-0.92    |
|                          |  | น้ำ         | 3700–21,000    | 2.85-1.46 | 36.3-13.9 | 1.4-1.01    |



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบตัวประกอบสมรรถนะทางความร้อนของงานวิจัยที่ผ่านมา

## 7. การเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนจากงานศึกษาที่ผ่านมา

งานศึกษาที่ผ่านมาที่ได้มีการปรับปรุงรูปทรงของแผ่นบิดในลักษณะต่าง ๆ เพื่อที่จะให้สมรรถนะทางความร้อนที่แตกต่างกันออกไป ในส่วนนี้ได้นำเสนอเปรียบเทียบผลของสมรรถนะทางความร้อนจากงานศึกษาบางส่วน คือ แผ่นบิดแบบสลับแกนการไหล (Alternate clockwise and counter-clockwise twisted tape) แผ่นบิดคู่ (Twin twisted tapes) แผ่นที่มีการตัดขอบเป็นรูปตัววี (V-cut twisted tape) แผ่นบิดที่มีการตัดขอบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Square-cut twisted tape) แผ่นบิดที่มีการตัดเป็นรูปปีกที่ขอบแผ่น (Delta-winglet twisted tape) แผ่นบิดแบบตัดขอบ (Peripherally-cut twisted tape) แผ่นบิดที่มีการเจาะรูที่ขอบแผ่น (Perforated twisted tape) แผ่นบิดที่มีการตัดขอบปีก (Jagged twisted tape) แผ่นบิดที่มีการตัดขอบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Notched twisted tape) แผ่นบิดที่มีรอยแยกบริเวณขอบแผ่น (Serrated twisted tape) และ

แผ่นบิดดั้งเดิม แผ่นบิดที่มีการตัดขอบ และ (Typical twisted tape)

จากรูปที่ 4 เป็นผลของสมรรถนะทางความร้อนกรณีต่างๆ แสดงให้เห็นว่าแผ่นบิดที่มีการปรับปรุงรูปทรงในลักษณะต่างๆ สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นบิดแบบดั้งเดิมได้ กรณีที่สมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่า 1 แสดงว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าการเพิ่มขึ้นของตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งจะเป็นผลดีต่อค่าสมรรถนะทางความร้อน โดยที่ค่าสมรรถนะทางความร้อนอยู่ในช่วง 1.0-1.4 สำหรับการไหลในช่วงปั่นป่วน แต่ทั้งนี้ยังคงมีแผ่นบิดบางรูปแบบที่ให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนค่อนข้างต่ำอันเนื่องจากความดันตกคร่อมที่เกิดจากแผ่นบิดมีค่อนข้างสูงมาก

## 8. สรุปข้อสังเกต

จากผลการศึกษาในงานที่ผ่านมาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าการใส่แผ่นบิดสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นได้และเป็นที่สังเกตได้ว่าการใส่แผ่นบิดในช่วงการไหลราบเรียบสามารถมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าในช่วงการไหลปั่นป่วน ซึ่งเป็นผลมาจากที่ช่วงการไหลราบเรียบจะมีชั้นขีดผิวความร้อนที่ค่อนข้างหนากว่าที่ช่วงการไหลปั่นป่วน เมื่อช่วงการไหลแบบราบเรียบมีการถูกระคายจึงมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างสูง

จากการศึกษายังพบได้ว่าการถ่ายเทความร้อนที่ทำการศึกษาที่ช่วงการไหลราบเรียบจะเพิ่มขึ้นได้ถึง 4 ถึง 12 เท่า และสมรรถนะทางความร้อนสูง 3 ถึง 5 เท่า ของท่อเปล่าสำหรับช่วงการไหลปั่นป่วนจะมีการไหลที่มีความเร็วสูงมากขึ้นชั้นขีดผิวความร้อนและความเร็วจะบางลงมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วง 1 ถึง 2 เท่า ซึ่งไม่สูงมากเท่าที่เมื่อเทียบกับช่วงการไหลราบเรียบ แต่ทั้งนี้ในการประยุกต์ในงานวิศวกรรมส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงการไหลปั่นป่วนดังนั้นการออกแบบแผ่นบิดที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นขณะที่ความตกคร่อมไม่สูงเกินไปหรือได้ค่าสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่า

### เอกสารอ้างอิง

- [1] L. M. Chamra, R. L. Webb and M. R. Randlett, "Advanced micro-fin tubes for evaporation", *International Journal Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 1827-1838, 1996.
- [2] S. Jaisankar, T. K. Radhakrishnan, K. N. Sheeba and S. Suresh, "Experimental investigation of heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of left-right twisted tapes", *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2638-2649, 2009.
- [3] S. Eiamsa-ard, P. Seemawute and K. Wongcharee, "Influences of peripherally-cut twisted tape insert on heat transfer and thermal performance characteristics in laminar and turbulent tube flows", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, pp. 711-719, 2010.
- [4] W. Liu, J. Guo, A. Fan and X. Zhang, "A numerical study on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow in a circular tube fitted with center-cleared twisted tape", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50, pp. 1263-1270, 2011.
- [5] K. Wongcharee and S. Eiamsa-ard, "Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through the round tubes inserted with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tapes", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp. 348-352, 2011.
- [6] P. Sivashanmugam and S. Suresh, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, pp. 301-308, 2007.
- [7] S. W. Chang, Y. J. Jan and J. S. Liou, "Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 506-518, 2007.
- [8] P. Promvonge, "Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators", *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 2949-2955, 2008.
- [9] C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, K. Wongcharee and S. Eiamsa-ard, "Compound heat transfer enhancement of a dimpled tube with a twisted tape swirl generator", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, pp. 698-704, 2009.
- [10] M. Rahimi, S. R. Shabani and A. A. Alsairafi, "Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts", *Chemical Engineering and Processing*, vol. 48, pp. 762-770, 2009.
- [11] P. K. Murugesan, K. Mayilsamy and S. Suresh, "Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with square-cut twisted tape", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 18, pp. 609-617, 2010.
- [12] S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, P. Eiamsa-ard and C. Thianpong, "Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts", *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 310-318, 2010.
- [13] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong and P. Eiamsa-ard, "Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, pp. 53-62, 2010.
- [14] S. Eiamsa-ard, "Study on thermal and fluid flow characteristics in turbulent channel flows with multiple twisted tape vortex generators", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 31, pp. 644-651, 2010.
- [15] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suresh, and P. S. S. Srinivasan, "Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp. 329-334, 2011.
- [16] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Effect of perforated twisted-tapes with parallel wings on heat transfer enhancement in a heat exchanger tube", *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1117-1123, 2012.
- [17] C. Thianpong, P. Eiamsa-ard and S. Eiamsa-ard, "Heat transfer and thermal performance characteristics of heat exchanger tube fitted with perforated twisted-tapes", *Heat Mass Transfer*, vol. 48, pp. 881-892, 2012.