การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีแผ่นบางรูปตัวไซน์

Experimental Study of Enhanced Heat Transfer in a Circular Tube Heat Exchanger with Sinusoidal Baffles

สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์[1*] เอกวุฒิ แสนคำวงษ์[1] และชาญวิทย์ ชัยอมฤต[1]
Supattarachai Suwannapan[1*] Eakkawut Saenkhamvong[1] and Chanwit Chaiamarit[1]

Received: March 19, 2019; Revised: May 14, 2019; Accepted: May 15, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาเชิงทดลองของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมที่มีการสอดใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบแผ่นบางรูปตัวไซน์ที่สภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ โดยในการทดลองจะมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแผ่นบางรูปตัวไซน์ คือ อัตราส่วนระยะพิตช์ (p/D = PR = 2 3 และ 4) และอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล (e/D = AR = 0.1 0.2 0.3 และ 0.4) ที่มีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดัน ในการศึกษาจะมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านท่อทดสอบซึ่งจะแสดงในรูปของตัวเลขเรย์โนลดส์ (Re) อยู่ในช่วงระหว่าง 4,500 - 29,200 ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันจะแสดงในเทอมของตัวเลขนัสเซิลท์ (Nu) และตัวประกอบเสียดทาน(f) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ทุกกรณีจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นจากท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วงระหว่าง 52 - 84 % และ 81 - 99 % ตามลำดับ ในกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า PR = 2 และ AR = 0.4 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงที่สุดซึ่งจะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีค่าเท่ากับ 6.0 - 6.5 เท่า และ 82.7 - 95.1 เท่า ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่มีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า PR = 2 และ AR = 0.2 จะให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด จะให้ค่า η มีค่าเท่ากับ 1.71 ที่ Re = 4,500

คำสำคัญ : แผ่นบางรูปตัวไซน์; อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน; การถ่ายเทความร้อน; ตัวประกอบเสียดทาน; ตัวสร้างการหมุนควง

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น*
[1] *Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus*
[*] *Corresponding Author E - mail Address: oak_su@hotmail.com*

Abstract

This research presents experimental study on heat transfer enhancement in a constant heat fluxed tube inserted with sinusoidal baffle vortex generator. Several sinusoidal baffle parameters were introduced such as pitch ratio (p/D = PR = 2, 3 and 4) and blockage ratio (e/D = AR = 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4). Various relative baffle heights and pitches were tested to investigate the effect of the sinusoidal baffles at on heat transfer and pressure loss. The study was conducted by varying the airflow rate through the tested tube for Reynolds number (Re) from 4,500 - 29,200. Heat transfer and pressure loss were presented in terms of Nusselt number (Nu) and friction factor (f) respectively. The results have shown that the tube with sinusoidal baffle provides a considerable increase in heat transfer and pressure loss in comparison with the smooth tube in the range of 52 - 84 % and 81 - 99 % respectively. The highest Nu/Nu_0 and f/f_0 were observed at PR = 0.2 and AR = 0.4 in the range of 6.0 - 6.5 times and 82.7 - 95.1 times respectively, whereas the maximum thermal enhancement factor (η) was at PR = 0.2 and AR = 0.2 of about 1.71 at Re = 4,500.

Keywords: Sinusoidal Baffle; Heat Exchanger; Heat Transfer; Friction Factor; Vortex Generator

บทนำ

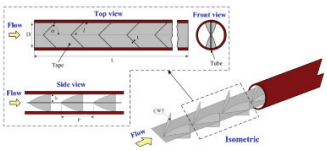
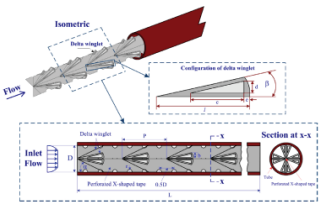
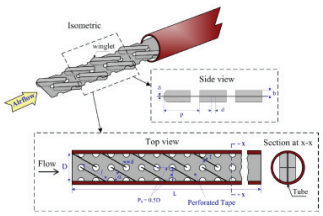
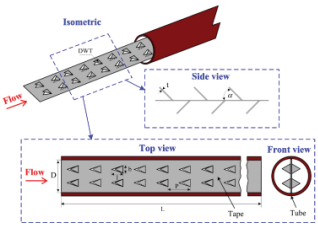
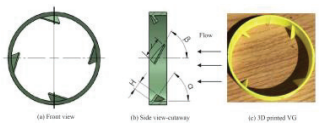
ปัจจุบันอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกใช้อย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ รวมกระทั่งใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป เพราะฉะนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงได้รับการปรับปรุงและพัฒนาให้มีสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้นเรื่อยมา สำหรับในทางวิศวกรรมแล้วการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้ได้สรรถนะสูงสุดตามที่ต้องการยังเป็นเรื่องที่ท้าทาย หนึ่งในเทคนิคที่ใช้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับความนิยมอย่างมาก คือ เทคนิคนี้เรียกว่า passive วิธีการของเทคนิคนี้จะเป็นการออกแบบลักษณะพื้นผิวของท่อแบบพิเศษต่างไปจากผิวเรียบเพื่อให้มีการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นโดยไม่ใช้พลังงานภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่างเช่น การเคลือบผิว การทำให้ผิวขรุขระ การยืดผิว การใส่อุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น วิธีการใส่อุปกรณ์เข้าไปภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอีกหนึ่งวิธีของเทคนิค passive ที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางสำหรับนักวิจัยต่าง ๆ วัตถุประสงค์ของการใส่อุปกรณ์ก็เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนควง (Turbulator/Vortex Generator) ขึ้นภายในท่อเพื่อไปขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal Boundary Layer) ที่บริเวณผนังท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ของไหลอุณหภูมิสูงที่บริเวณผนังท่อสามารถถ่ายเทมาผสมกับอุณหภูมิของไหลที่เย็นกว่าภายในท่อได้ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในท่อให้ดีขึ้นตามไปด้วย อุปกรณ์ที่นิยมใส่เข้าไปภายในท่อมีอยู่หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ครีบ แผ่นบาง ปีก (Fin, Rib, Baffle, Winglet) ใบบิด (Twisted Tape) ขดลวด (Wire Coil) เป็นต้น แนวคิดในการนำเอาตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนควง

มาติดตั้งภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีคือช่วยในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ก็มีข้อพิจารณาอยู่เช่นเดียวกันคือทำให้เกิดการสูญเสียความดันและความเสียดทานเพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นในการออกแบบตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนควงที่จะใส่เข้าไปภายในท่อจึงต้องพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ หลายตัว เช่น รูปร่าง ขนาด ความสูง มุม และระยะห่าง เป็นต้น เพราะว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นล้วนแต่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันทั้งสิ้น

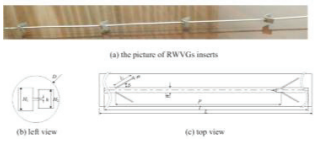
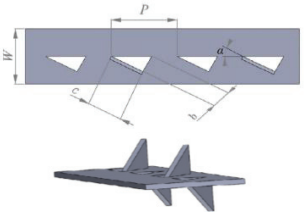
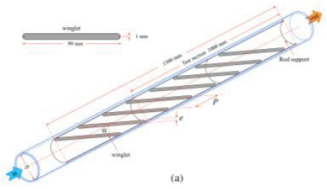
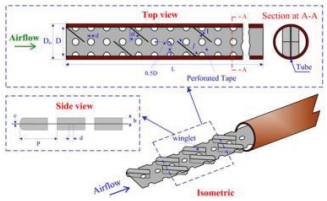
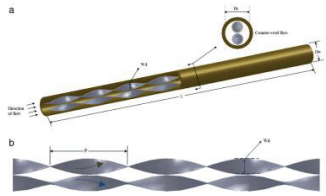
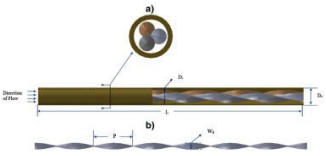
หลายปีที่ผ่านมานี้มีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อด้วยวิธีการใส่อุปกรณ์เข้าไปภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ กล่าวคือ [1] - [4] ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่ปีก (Winglet) ลักษณะรูปร่างต่าง ๆ คือ Curved-Winglet Tape, Quadruple Perforated-Delta-Winglet Pairs, Staggered-Winglet Perforated-Tape และ Delta-Wing Tape เข้าไปภายในท่อเพื่อช่วยสร้างการหมุนควงตามแนวยาว โดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น มุมปะทะการไหล ระยะพิตช์ และความสูง เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใส่ปีกแบบต่าง ๆ สามารถช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าท่อเปล่าผนังเรียบ [5] ได้นำเสนอผลจากการศึกษาสมรรถนะความร้อนและพฤติกรรมของการไหลภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Delta Winglet โดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น มุมปะทะการไหล ระยะพิตช์ ความสูง และจำนวนแถว เป็นต้น และรายงานว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมุมปะทะการไหลและความสูงของปีกเพิ่มขึ้นในขณะที่ระยะพิตช์มีค่าลดลง [6] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขเกี่ยวกับคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Rectangular Winglet และพบว่าการใส่ตัวสร้างการหมุนควงจะช่วยทำให้ของไหลอุณหภูมิต่ำที่แกนกลางของท่อผสมได้ดีกับของไหลอุณหภูมิสูงที่ผนังของท่อส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในท่อได้ดีขึ้น [7] ได้นำเสนอผลการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของการไหลภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Punched Delta Winglet ที่มีการปรับเปลี่ยนมุมปะทะ [8] ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนด้วยการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบปีกและพบว่าท่อที่มีการใส่ปีกจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีว่าท่อที่มีการใส่ใบบิดและขดลวด [9] ได้นำเสนอผลของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Zigzag-Winglet Perforated-Tape และได้รายงานว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความสูงและระยะพิตช์ของตัวสร้างการหมุนควง [10] - [11] ได้ศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ใบบิดแบบ Double Counter Twisted Tape และ Triple Twisted Tape โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการบิดและได้รายงานว่าท่อที่มีการใส่ใบบิดสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อเปล่าผนังเรียบและค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการบิดมีค่าลดลง [12] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะความร้อนภายในท่อด้วยการใส่ใบบิดหลากหลายรูปแบบและได้รายงานว่าการใส่ใบบิดแบบ Multiple Twisted-Tape จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบ Single Twisted-Tape [13] - [14] ได้นำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่ใบบิด โดยใบบิดที่ใส่เข้าไปจะถูกประยุกต์เป็นแบบ Perforated Helical Twisted-Tapes และ Helically Twisted Tapes จากการศึกษาพบว่าใบบิดที่ได้รับการประยุกต์ทั้งสองแบบสามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับท่อเปล่าผนังเรียบ นอกจากนี้ [15] ได้นำเสนอศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อโดยการใส่ขดลวดที่ได้รับการ

ปรับปรุงใหม่ รวมไปถึง [16] - [18] ที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในท่อโดยการใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบ Inclined Vortex Ring, Circular-Rings and Twisted Tapes และ Twisted-Ring ตามลำดับ [19] ได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษารูปแบบการไหลและหาค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ จากการศึกษาพบว่าแผ่นบางรูปตัวไซน์จะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของของไหลภายในท่อทำให้สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ ผลจากการศึกษาของนักวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

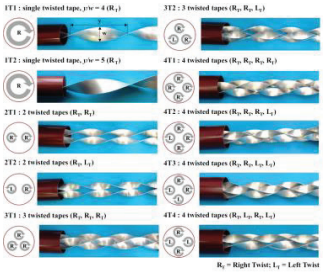
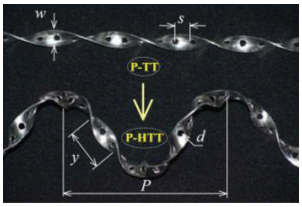
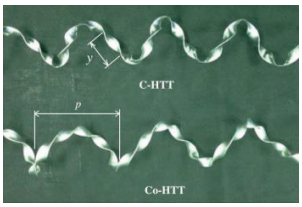
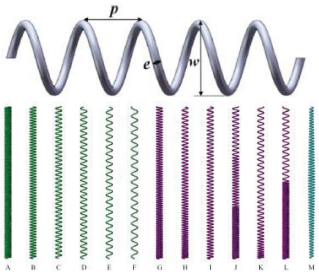
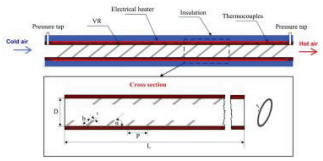
ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

ชื่อนักวิจัย	ลักษณะรูปทรง	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Skullong, S. et al. [1]		Re = 4,150 - 25,400 PR = 0.5, 1.0, 2.0 BR = 0.1, 0.2, 0.3 $\alpha = 45^{o}$	Nu/Nu_0 = 3.4 - 4.8 f/f_0 = 2.06 - 35.68 η = 1.22 - 1.75
Skullong, S. et al. [2]		Re = 4,180 - 26,000 PR = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 BR = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 A_p/A_w = 0.359 $\alpha = 30^{o}$	Nu/Nu_0 = 2.0 - 5.06 f/f_0 = 2.06 - 35.68 η = 1.42 - 1.91
Skullong, S. et al. [3]		Re = 4,180 - 26,000 PR = 0.5, 1.0, 1.5 BR = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 $\alpha = 30^{o}$	Nu/Nu_0 = 2.4 - 4.77 f/f_0 = 5.0 - 42.9 η = 1.34 - 1.71
Skullong, S. et al. [4]		Re = 4,200 - 25,500 P/D = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 b/D = 2 l/D = 0.4 $\alpha = 30^{o}, 45^{o}, 60^{o}$	Nu/Nu_0 = 2.4 - 5.1 f/f_0 = 7.5 - 79.1 η = 1.04 - 1.49
Xu, Y. et al. [5]		Re = 6,000 - 33,000 B = 0.1, 0.2, 0.3 PR = 4.8, 2.4, 1.6 N = 4, 8, 12 $\beta = 0^{o}, 15^{o}, 30^{o}, 45^{o}$	$Nu/Nu_{0,max}$ = 2 $f/f_{0,max}$ = 4.8 η_{max} = 1.45

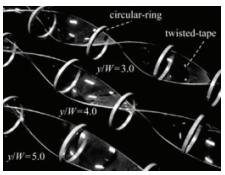
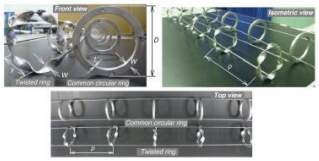
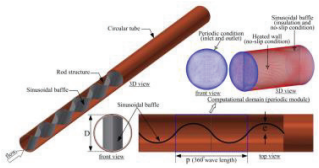
ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา (ต่อ)

ชื่อนักวิจัย	ลักษณะรูปทรง	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Liu, H. L. et al. [6]		Re = 5,000 - 17,000 H1/D = 0.5 H2/D = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 β = 10° ,20° ,30°, 35°	Nu/Nu_0 = 1.16 - 2.49 f/f_0 = 2.09 - 12.32 η = 0.82 - 1.18
Wijayanta, A. T. et al. [7]		Re = 5,500 - 14,500 R_P = 1.05 R_B = 0.42 α = 30° ,50°, 70°	Nu = 40 - 330 f = 0.1 - 0.51 η = 0.88 - 1.22
Chokphoemphun, S. et al. [8]		Re = 5,300 - 24,000 P/D = 0.5, 1, 1.5, 2 e/D = 0.1, 0.15, 0.2 α = 30°	Nu/Nu_0 = 2.03 - 2.34 f/f_0 = 2.07 - 5.63 η = 1.35 - 1.59
Suwannapan, S. et al. [9]		Re = 4,200 - 26,000 b/D = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 P/D = 1.0, 1.5 α = 45°	Nu/Nu_0 = 3.1 - 5.1 f/f_0 = 12.5 - 53.6 η_{max} = 1.59
Bhuiya, M. M. K. et al. [10]		Re = 6,950 - 50,050 y = 1.95, 3.85, 5.92, 7.75	Nu_p/Nu_s = 1.55 - 3.45 f_p/f_s = 1.8 - 3.9 η_{max} = 1.34
Bhuiya, M. M. K. et al. [11]		Re = 7,200 - 50,200 y = 1.92, 2.88, 4.81, 6.79	Nu_p/Nu_s = 1.75-3.85 f_p/f_s = 1.8-4.2 η_{max} = 144

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา (ต่อ)

ชื่อนักวิจัย	ลักษณะรูปทรง	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Chokphoemphun, S. et al. [12]		Re = 5,300 - 24,000 y/w = 4, 5	Nu/Nu_0 = 1.15 - 2.12 f/f_0 = 1.98 - 4.06 η = 0.92 - 1.33
Nanan, K. et al. [13]		Re = 6,000 - 20,000 d/w = 0.2, 0.4, 0.6 s/w = 1.0, 1.5, 2.0 P/D = 2 y/w = 3	P-TT: Nu_t/Nu_p = 1.6 - 2.07 f_p/f_s = 4.1 - 4.35 P-HTT: Nu_p/Nu_s = 1.5 - 2.04 f_p/f_s = 3.4 - 4.2 η_{max} = 1.28
Nanan, K. et al. [14]		Re = 6,000 - 20,000 w/D = 0.2 p/D = 1, 1.5, 2 y/w = 3	C-HTT: Nu_t/Nu_p = 2.5 - 3.3 f_p/f_s = 12 - 37 Co-HTT: Nu_p/Nu_s = 1.7 - 2.3 f_p/f_s = 4 - 12 η_{max} = 1.29
Hong, Y. et al. [15]		Re = 6,000 - 20,000 WCs-UP: p/d = 0.172 - 1.034 WCs-VP: p/d = 0.172 - 0.690 WCs-GVW: w/d = 0.552 - 0.897 - 0.552	Nu/Nu_0: WCs-UP = 1.46 - 2.49 WCs-VP = 1.75 - 2.30 WCs-GVW = 2.2 - 2.3 f/f_0: WCs-UP = 8.36 - 17.8 WCs-VP = 0.49 - 18.3 WCs-GVW = 16 - 18.6 η = 0.69-1.14
Promvonge, P. et al. [16]		Re = 5,000 - 26,000 b/D = 0.1, 0.15, 0.2 P/D = 0.5, 1, 1.5, 2 α = 30°	Nu/Nu_0 = 1.91 - 4.35 f/f_0 = 4.9 - 36.5 η_{max} = 1.4

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา (ต่อ)

ชื่อนักวิจัย	ลักษณะรูปทรง	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Eiamsa-ard, S. et al. [17]		Re = 6,000 - 20,000 l/D = 1, 1.5, 2 y/w = 3, 4, 5	Nu_t/Nu_p = 2.4 - 4.5 f_p/f_s = 5 - 36 η_{max} = 1.42
Thianpong, C. et al. [18]		Re = 6,000 - 20,000 w/D = 0.05, 0.1, 0.15 p/D = 1, 1.5, 2	Nu/Nu_p = 1.6 - 3.4 f_p/f_s = 3 - 50 η_{max} = 1.24
Promthaisong, P. and Suwannapan, S. [19]		Re = 5,000 - 2 0,000 PR = 1, 2, 3 AR = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25	Nu/Nu_0 = 1.4 - 7.7 f/f_0 = 3.6 - 117 η = 1.12 - 1.90

จากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตเห็นได้ชัดเจนว่าการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวสร้างการไหลแบบปั่นป่วนหรือหมุนควง สามารถช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะการติดตั้งตัวสร้างการไหลแบบปั่นป่วนหรือหมุนควง แบบครีบ ปีกหรือแผ่นบาง ภายในท่อแลกเลี่ยนความร้อน โดยตัวสร้างการไหลแบบปั่นป่วนหรือหมุนควงจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสการไหลแบบหมุนควง ซึ่งมีระดับการไหลที่แข็งแรงกว่าการไหลในลักษณะอื่น ส่งผลให้สามารถลดหรือทำลายชั้นขอบเขตความร้อนที่ผิวท่อได้เป็นอย่างดี ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ นำแผ่นบางมาประยุกต์ใช้ในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อกลม โดยการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่มีอัตราส่วนระหว่างระยะพิตช์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหรืออัตราส่วนระยะพิตช์ (p/D = PR = 2 3 และ 4) อัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหรืออัตราส่วนการปิดกั้นการไหล (e/D = AR = 0.1 0.2 0.3 และ 0.4) ในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลดส์ Re = 4,500 - 29,200 เพื่อเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนให้แก่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ทฤษฎีและการคำนวณ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และสมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม โดยใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบซึ่งแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลดส์และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (1) ดังนี้

$$\mathrm{Re} = UD/\nu \tag{1}$$

โดยที่

U คือ ความเร็วเฉลี่ย

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่อากาศได้รับ $\left(Q_{air}\right)$ และการพาความร้อน $\left(Q_{conv}\right)$ (สมการที่ (2))

$$Q_{air} = Q_{conv};\quad \dot{m}C_p\left(T_o - T_i\right) = hA\left(\widetilde{T}_s - T_b\right) \tag{2}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $\left(h\right)$ หาค่าได้จากสมการที่ (3)

$$h = \frac{\dot{m}C_p\left(T_o - T_i\right)}{A\left(\widetilde{T}_s - T_b\right)} \tag{3}$$

เมื่อ $T_b = \left(T_o + T_i\right)/2$ และ $\widetilde{T}_s = \sum T_s / 30$

โดยที่

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ

T_o คือ อุณหภูมิทางออก

T_i คือ อุณหภูมิทางเข้า

$\widetilde{T}_s$ คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ย

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

เลขนัสเซิลท์เฉลี่ย $\left(Nu\right)$ และตัวประกอบเสียดทาน $\left(f\right)$ หาค่าได้ดังนี้

$$Nu = hD/k \tag{4}$$

$$f = \frac{2}{\left(L/D\right)}\frac{\Delta P}{\rho U^2} \tag{5}$$

โดยที่

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทดสอบ

ΔP คือ ค่าความดันตกคร่อมชุดทดสอบ

L คือ ความยาวท่อทดสอบ

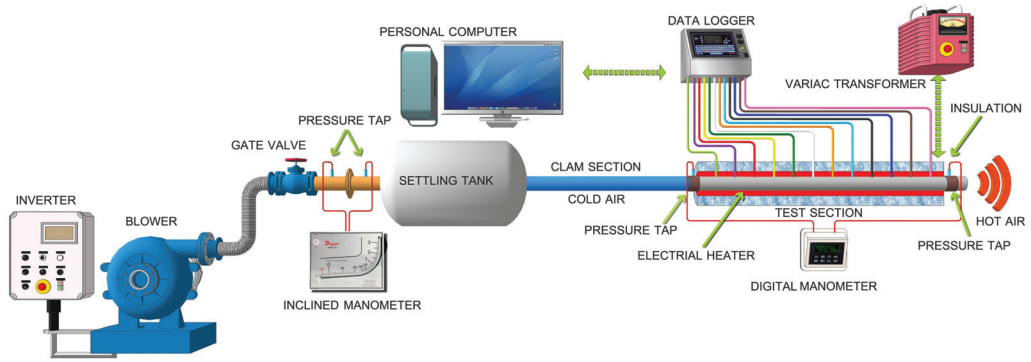
ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

การประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงในเทอมของตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนความร้อน (Thermal Enhancement Factor, η) ที่นิยามโดยอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อที่มีการใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ h กับท่อผิวเรียบ h_0 ที่สภาวะกำลังของพัดลมที่คงที่ (Constant Blowing Power, bp) [20] โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$\eta = \left.\frac{h}{h_0}\right|_{bp} = \left.\frac{Nu}{Nu_0}\right|_{bp} = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right) \Big/ \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3} \tag{6}$$

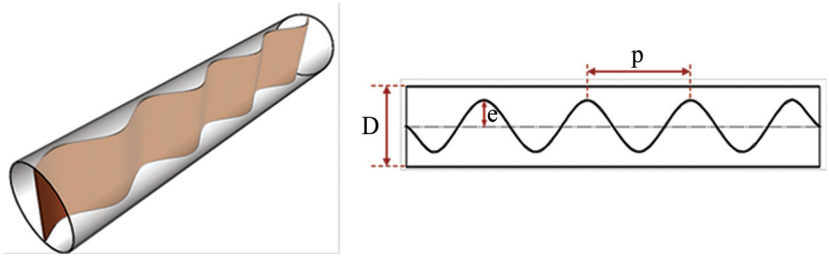
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ พัดลม (Blower) ใช้เป็นแหล่งจ่ายอากาศซึ่งเป็นของไหลทดสอบอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของพัดลมแผ่นออริฟิค (Orifice Plate) ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าชุดทดสอบมานอมิเตอร์ระนาบเอียง (Inclined Manometer) ใช้วัดค่าความดันความดันแตกต่างถังพักลม (Settling Tank) ทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีความเสถียรก่อนเข้าชุดทดสอบ สภาพการไหลของอากาศให้มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ส่วนทดสอบ (Test Section) ในส่วนนี้มีจะมีการให้ความร้อนแก่ท่อและมีการสอดใส่ชิ้นงานทดสอบ โดยจะมีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K จำนวน 30 ตัว ถูกติดตั้งที่ผิวด้านนอกของท่อทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิผิว ในขณะที่อีกจำนวน 2 ตัว ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบ ท่อทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 mm หนา 3 mm ถูกทำให้ร้อนด้วยฮีตเตอร์ (Heater) แบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ และทำการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน มานอมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Manometer) ใช้วัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่งทางเข้าและทางออกของส่วนทดสอบ เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger) และคอมพิวเตอร์ใช้เป็นตัวอ่านค่าอุณหภูมิผิว อุณหภูมิทางเข้า-ออกส่วนทดสอบ และบันทึกค่าอุณหภูมิหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac Transformer) ใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมความร้อนที่จ่ายให้กับระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

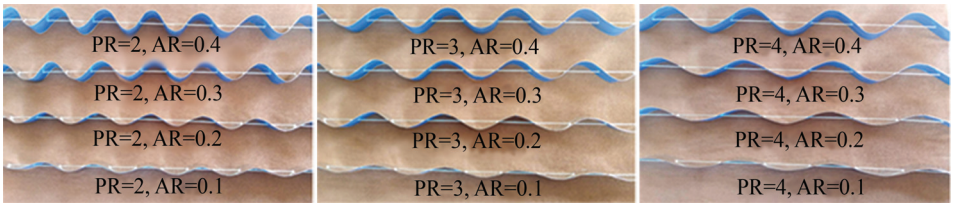


รูปที่ 1 ชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ลักษณะการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ใช้เป็นตัวสร้างการไหลแบบปั่นป่วนหรือตัวสร้างการหมุนควงภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 2(ก) แผ่นบางที่ใช้สำหรับสอดใส่ในท่อทดสอบทำจากแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาเท่ากับ 0.5 mm มีขนาดความกว้างเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ D = 50 mm และยาวเท่ากับ 1,200 mm จากนั้นแผ่นบางดัดให้เป็นคลื่นรูปตัวไซน์ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ที่มีค่าอัตราส่วนระยะพิตช์ที่นิยามโดยอัตราส่วนระหว่างระยะพิตช์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (p/D = PR = 2 3 และ 4) และที่มีค่าอัตราส่วนการปิดกั้นการไหลที่นิยามโดยอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (e/D = AR = 0.1 0.2 0.3 และ 0.4) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



(ก) ลักษณะการติดตั้งแผ่นบางรูปตัวไซน์ภายในท่อ



(ข) แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่มีการปรับเปลี่ยนค่า PR และ AR

รูปที่ 2 แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการทดลอง

การทดสอบท่อเปล่าผนังเรียบ

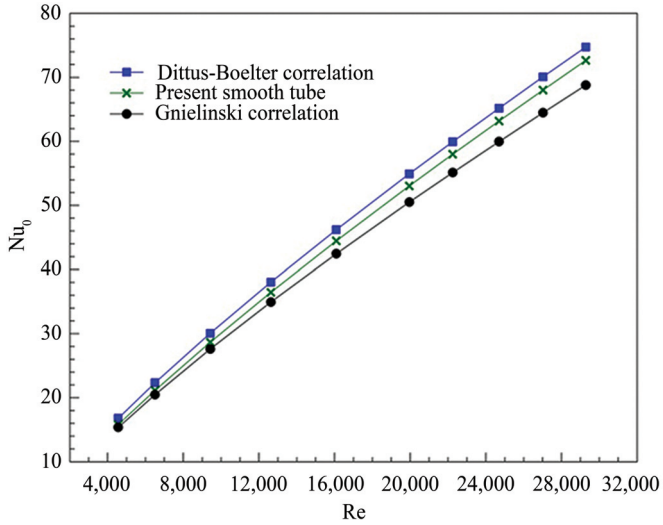
เพื่อความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือของการทดสอบจึงได้ทำการทดสอบท่อเปล่าผนังเรียบเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่แสดงในเทอมของตัวเลขนัสเซิลท์ (Nu) และการสูญเสียความดันที่แสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน (f) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ในอดีต[21] โดยผลของ Nu ที่ได้จากการทดลองจะนำไปทำการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Gnielinski ดังแสดงในสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ ในขณะที่ผลของ f จะนำไปทำการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Blasius และ Petukhov ดังแสดงในสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.4} \tag{7}$$

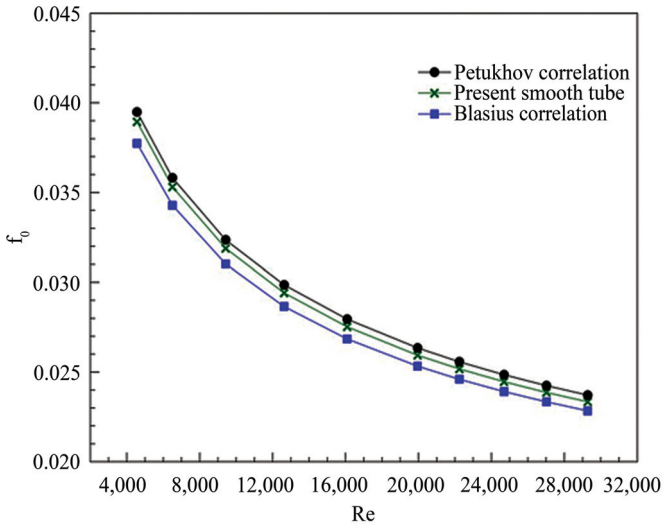
$$Nu = \frac{(f/8)(\mathrm{Re}-1000)\mathrm{Pr}}{1+12.7(f/8)^{1/2}(\mathrm{Pr}^{2/3}-1)} \tag{8}$$

$$f = 0.316\,\mathrm{Re}^{-0.25} \tag{9}$$

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



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_0 กับ Re กรณีท่อเปล่าผนังเรียบ

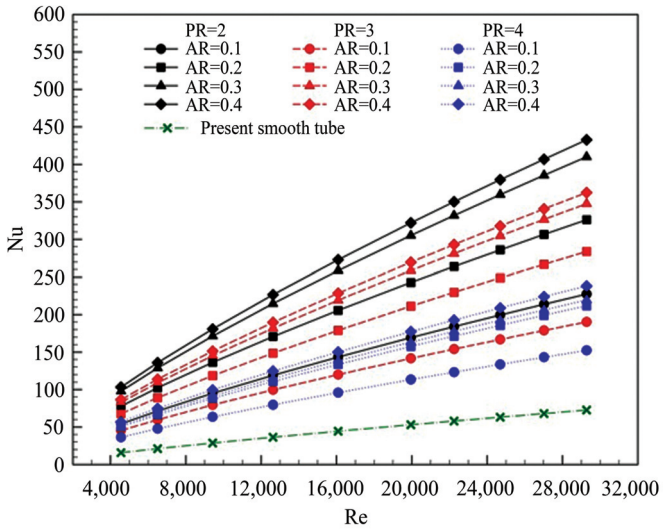


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง f_0 กับ Re กรณีท่อเปล่าผนังเรียบ

การเปรียบเทียบค่า Nu และ f แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า Nu ที่ได้จากการทดลองเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter และ Gnielinski และรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า f ที่ได้จากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Blasius และ Petukhov ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าทั้งค่า Nu และ f มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5 % จากผลของการเปรียบเทียบดังที่กล่าวมาจึงสามารถยืนยันได้ว่าชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบมีความน่าเชื่อถือของผลการทดลองได้เป็นอย่างดี

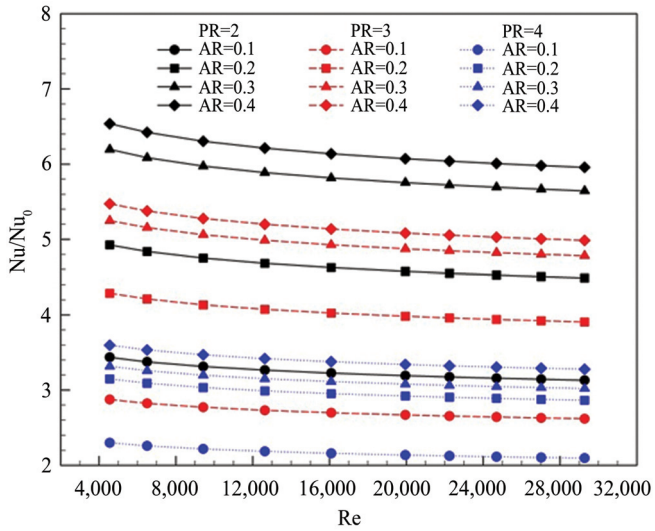
อิทธิพลของ *PR* และ *AR* ต่อการถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่ตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบแผ่นบางรูปตัวไซน์ แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนในเทอมของตัวเลขนัสเซิลท์ (Nu) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติกับค่า Re จากการทดลองพบว่าค่า Nu จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Re และ AR เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า PR ลดลงที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า AR ที่มีค่ามากและค่า PR ที่มีค่าน้อยจะทำให้กระแสการไหลของอากาศเกิดการกระทบกับแผ่นบางรูปตัวไซน์มากขึ้นและสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนควงที่มีระดับการไหลที่แข็งแรงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า AR ที่มีค่าน้อย และค่า PR ที่มีค่ามาก [19] กระแสของการหมุนควงที่เกิดขึ้นจะไปทำลายชั้นขอบเขตความร้อนที่บริเวณผนังท่อทำให้ของไหลอุณหภูมิต่ำบริเวณกลางท่อและของไหลอุณหภูมิสูงบริเวณผิวท่อเกิดการผสมผสานกันได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น การสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ทุกกรณีจะให้ค่า Nu สูงกว่าท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วง 52 - 84 % โดยกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $AR = 0.4$ และ $PR = 2$ จะให้ค่า Nu สูงกว่ากรณีอื่น ๆ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re

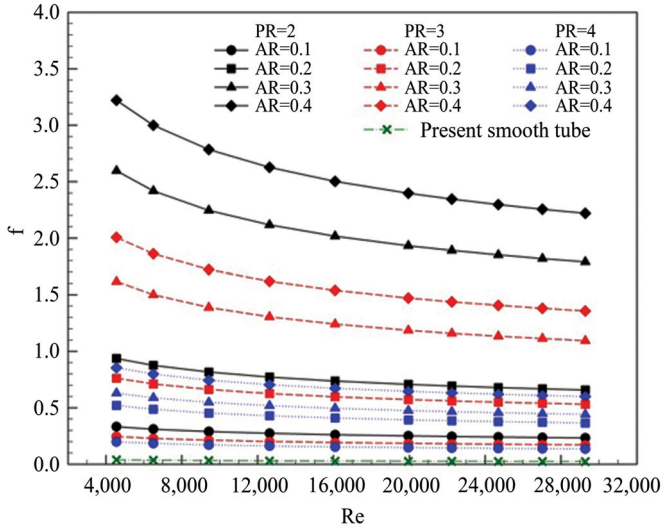
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวเลขนัสเซิลท์กรณีสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ต่อตัวเลขนัสเซิลท์ของท่อเปล่าผนังเรียบ (Nu/Nu_0) กับ Re จากการทดลองพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลง โดยการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $PR=2$ $AR=0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4; $PR=3$ $AR=0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4; $PR=4$ $AR=0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 จะให้ค่า Nu/Nu_0 เท่ากับ 3.1 - 6.5 2.6 - 5.5 และ 2.1 - 3.6 เท่า ตามลำดับ



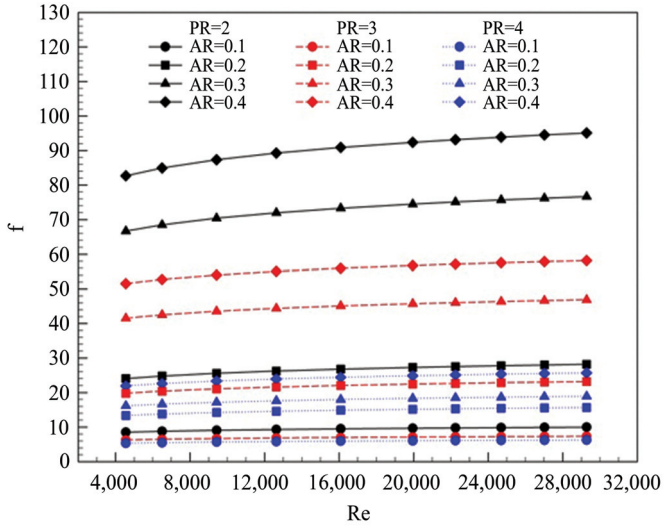
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re

อิทธิพลของ *PR* และ *AR* ต่อการสูญเสียความดัน

ค่าการสูญเสียความดันเนื่องจากการผลักดันของไหลผ่านท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์แสดงในเทอมของตัวประกอบเสียดทาน (f) และอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ต่อตัวประกอบความเสียดทานของท่อผนังเรียบ (f/f_0) แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re จากการทดลองพบว่าค่า f จะลดลงเมื่อค่า Re และ AR ลดลงในขณะที่ค่า PR เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า AR ที่มีค่ามาก และค่า PR ที่มีค่าน้อย จะทำให้เกิดการปิดกั้นการไหลของอากาศภายในท่อที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า AR ที่มีค่าน้อย และค่า PR ที่มีค่ามาก จึงทำให้เกิดการสูญเสียความดันที่สูงขึ้น การสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ทุกกรณีจะให้ค่า f สูงกว่าท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วง 81 - 99 % โดยกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $AR=0.4$ และ $PR=2$ จะให้ค่า f สูงกว่ากรณีอื่น ๆ รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานกรณีสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อเปล่าผนังเรียบ (f/f_0) กับ Re จากการทดลองพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่า f/f_0 เพิ่มขึ้น โดยการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $PR=2$ $AR=0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4; $PR=3$ $AR=0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4; $PR=4$ $AR=0.1$ 0.2 0.3 และ 0.4 จะให้ค่า f/f_0 เท่ากับ 8.5 - 95.1 6.3 - 58.2 และ 5.3 - 25.7 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re

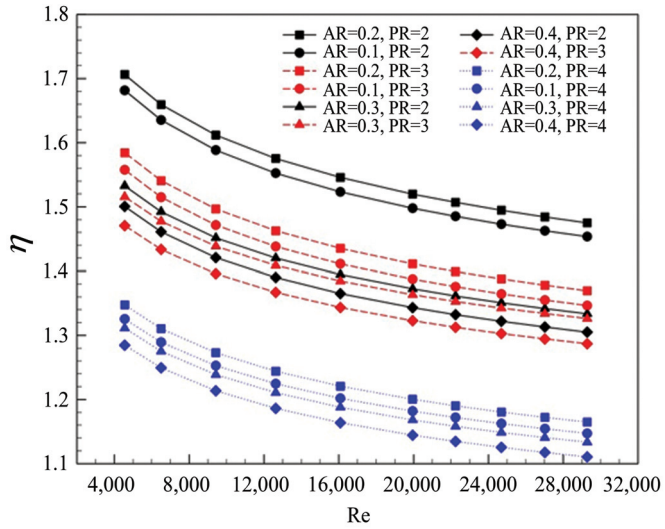


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง f / f_0 กับ Re

ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นแต่สิ่งที่ตามมาคือ ค่าการสูญเสียความดันที่เพิ่มสูงขึ้นตามมาด้วยเช่นกัน จึงเป็นการยากที่จะบอกการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์เข้าไปภายในท่อได้ว่าดีหรือไม่ดี ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการประเมินถึงสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่ตัวสร้างความปั่นป่วนหรือตัวสร้างการไหลหมุนควง ที่เรียกว่า ตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Thermal Enhancement Factor, η) โดยมีนิยาม คือ อัตราส่วนของการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนต่ออัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียความดัน ซึ่งพิจารณาภายใต้สภาวะ

ที่กำลังขับพัดลมเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ (6) รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re จากการทดลองพบว่า ค่า η มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ทุกกรณีจะให้ค่า η สูงกว่ากรณีของท่อเปล่าผนังเรียบ และมีค่าอยู่ระหว่าง 1.11 - 1.71 ในกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $PR = 4$ สำหรับทุก ๆ ค่า AR จะให้ค่า η ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่า $PR = 2$ และ 3 ในกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $PR = 2$ และ $AR = 0.2$ จะให้ค่า η สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.71 ที่ Re = 4,500



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ Re

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเชิงทดลองเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมด้วยการสอดใส่ตัวสร้างการไหลหมุนควงแบบแผ่นบางรูปตัวไซน์ที่มีอากาศเป็นของไหลทดสอบในช่วงระหว่าง Re = 4,500 - 29,200 โดยมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ คือ อัตราส่วนระยะพิตช์ (p/D = PR = 2 3 และ 4) และอัตราส่วนการปิดกั้นการไหล (e/D = AR = 0.1 0.2 0.3 และ 0.4) สามารถสรุปได้ดังนี้ การสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ทุกกรณีสามารถช่วยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจากท่อเปล่าผนังเรียบอยู่ในช่วงระหว่าง 52 - 84 % ในขณะค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 81 - 99 % ในกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $PR = 2$ และ $AR = 0.4$ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ซึ่งจะให้ค่า Nu/Nu_0 และ f/f_0 มีค่าเท่ากับ 6.0 - 6.5 เท่า และ 82.7 - 95.1 เท่า ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่มีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $PR = 2$ และ $AR = 0.2$ จะให้ค่าตัวประกอบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ให้ค่า η มีค่าเท่ากับ 1.71 ที่ Re = 4,500 และในกรณีการสอดใส่แผ่นบางรูปตัวไซน์ที่ค่า $PR = 4$ สำหรับทุก ๆ ค่า AR จะให้ค่า η ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่า $PR = 2$ และ 3 จึงไม่แนะนำให้ทำการออกแบบแผ่นบางรูปตัวไซน์ที่มีค่า PR มากกว่า 3

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ได้ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้

References

[1] Skullong, S., Promvonge, P., Thianpong, C., and Pimsarn, M. (2018). Thermal Performance of Heat Exchanger Tube Inserted with Curved-Winglet Tapes. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 129, pp. 1197-1211. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.110

[2] Skullong, S., Promvonge, P., Thianpong, C., and Jayranaiwachira, N. (2017). Thermal Behaviors in a Round Tube Equipped with Quadruple Perforated-Delta-Winglet Pairs. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 115, pp. 229-243. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.082

[3] Skullong, S., Promvonge, P., Thianpong, C., and 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. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2015.12.007

[4] Skullong, S., Promvonge, P., Jayranaiwachira, N., and 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. DOI: 10.1016/j.cep.2016.09.005

[5] Xu, Y., Islam, M. D., and Kharoua, N. (2018). Experimental Study of Thermal Performance and Flow Behaviour with Winglet Vortex Generators in a Circular Tube. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 135, pp. 257-268. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.112

[6] Liu, H. L., Li, H., He, Y. L., and Chen, Z. T. (2018). Heat Transfer and Flow Characteristics in a Circular Tube Fitted with Rectangular Winglet Vortex Generators. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Vol. 126, Part A, pp. 989-1006. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.038

[7] Wijayanta, A. T., Istanto, T., Kariya, K., and Miyara, A. (2017). Heat Transfer Enhancement of Internal Flow by Inserting Punched Delta Winglet Vortex Generators with Various Attack Angles. **Experimental Thermal and Fluid Science**. Vol. 87, pp. 141-148. DOI: 10.1016/j.expthermflusci. 2017.05.002

[8] Chokphoemphun, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., and Promvonge, P. (2015). Heat Transfer Augmentation in a Circular Tube with Winglet Vortex Generators. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. Vol. 23, Issue 4, pp. 605-614. DOI: 10.1016/j.cjche.2014.04.002

[9] Suwannapan, S., Skullong, S., and Promvonge, P. (2015). Thermal Characteristics in a Heat Exchanger Tube Fitted with Zigzag-Winglet Perforated-Tapes. **Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering**. Vol. 3, No. 1, pp. 29-36. DOI: 10.14456/jrame.2015.3

[10] Bhuiya, M. M. K., Sayema, A. S. M., Islam, M., Chowdhur, M. S. U., and Shahabuddin, M. (2014). Performance Assessment in a Heat Exchanger Tube Fitted with Double Counter Twisted Tape Inserts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 50, pp. 25-33. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.005

[11] Bhuiya, M. M. K., Chowdhur, M. S. U., Shahabuddin, M., Saha, M., and Memon, L. A. (2013). Thermal Characteristics in a Heat Exchanger Tube Fitted with Triple Twisted Tape Inserts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 48, pp. 124-132. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.024

[12] Chokphoemphun, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., and Promvonge, P. (2015). Thermal Performance of Tubular Heat Exchanger with Multiple Twisted-Tape Inserts. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. Vol. 23, Issue 5, pp. 755-762. DOI: 10.1016/j.cjche.2015.01.003

[13] Nanan, K., Thianpong, C., Promvonge, P., and Eiamsa-ard, S. (2014). Investigation of Heat Transfer Enhancement by Perforated Helical Twisted-Tapes. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 52, pp. 106-112. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.018

[14] Nanan, K., Yongsiri, K., Wongcharee, K., Thianpong, C., and Eiamsa-ard, S. (2013). Heat Transfer Enhancement by Helically Twisted Tapes Inducing Co- and Counter-Swirl Flows. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 46, pp. 67-73. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.015

[15] Hong, Y., Dua, J., Wang, S., Huang, S. M., and Ye, W. B. (2018). Heat Transfer and Fluid Flow Behaviors in a Tube with Modified Wire Coils. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 124, pp. 1347-1360.

[16] Promvonge, P., Koolnapadol, N., Pimsarn, M., and Thianpong, C. (2014). Thermal Performance Enhancement in a Heat Exchanger Tube Fitted with Inclined Vortex Rings. **Applied Thermal Engineering**. Vol. 62, Issue 1, pp. 285-292. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.031

[17] Eiamsa-ard, S., Kongkaitpaiboon, V., and Nanan, K. (2013). Thermohydraulics of Turbulent Flow Through Heat Exchanger Tubes Fitted with Circular-Rings and Twisted Tapes. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. Vol. 21, Issue 6, pp. 585-593. DOI: 10.1016/S1004-9541(13)60504-2

[18] Thianpong, C., Yongsiri, K., Nanan, K., and Eiamsa-ard, S. (2012). Thermal Performance Evaluation of Heat Exchangers Fitted with Twisted-Ring Turbulators. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 39, Issue 6, pp. 861-868. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.04.004

[19] Promthaisong, P. and Suwannapan, S. (2018). Turbulent Flow Behaviors on Thermal Enhancement in a Circular Tube Heat Exchanger Equipped with Sinusoidal Baffles. Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering. Vol. 6, No. 2, pp. 95-112. DOI: 10.14456/jrame.2018.10

[20] Webb, R. L. (1992). **Principles of Enhanced Heat Transfer**. New York. John-Wiley & Sons.

[21] Incropera, F. P., DeWitt, P. D., Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2006). **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John-Wiley & Sons.