

การออกแบบตัวสร้างความปั่นป่วนสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนท่อสี่เหลี่ยม

Design of Turbulators for a Rectangular Duct Heat Exchanger

กิตตินันท์ วันสาธิบ¹ และ สุจินต์ บุรีรัตน์^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, 40002

*ติดต่ออีเมล: subur@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการออกแบบเชิงตัวเลขของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยม โดยมีอากาศเป็นของไหล การสร้างระบบจำลองเพื่อหารูปทรงทางเรขาคณิตตัวสร้างความปั่นป่วนที่ดีที่สุดส่งผลให้เกิดการไหลปั่นป่วน และเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการวิเคราะห์ทางไฟไนท์โวลุ่ม (Finite Volume Analysis) จะถูกใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบทางกลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวสร้างความปั่นป่วน ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์หารูปแบบของตัวสร้างความปั่นป่วนทั้งในส่วนของการเลือกตำแหน่งติดตั้ง และขนาด เพื่อให้ได้ตัวสร้างความปั่นป่วนที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและลดการสูญเสียแรงดันได้ดีที่สุด

คำหลัก: อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน, การไหลในท่อสี่เหลี่ยม, พลศาสตร์ของไหล

Abstract

This research studied numerical investigation on laminar flow and heat transfer behaviors in a rectangular channel duct heat exchanger with air being fluid. The paper is aimed at finding geometries of U-shape baffles that increase the thermal performance of the heat exchanger by using finite volume analysis as a means for Computational Fluid Dynamics (CFD) design. The design parameters include baffle height and pitch ratios while the performance indicators are Nusselt number and friction with respect to a square smooth rectangular duct. Numerical experiment was conducted and the results were compared.

Keywords: Heat exchangers, Thermal performance, Periodic channel flow, Computational Fluid Dynamics.

1. บทนำ

การรณรงค์ลดการใช้พลังงาน และปัญหาด้านพลังงาน กำลังเป็นที่ศึกษากันอยู่ในปัจจุบัน สังเกตได้จากข้อมูลสัดส่วนการใช้พลังงานของกระทรวงพลังงานว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 1.2% ในปี 2556 ขณะที่ภาพรวมการใช้พลังงานปี 2557 คาดว่าจะเพิ่มขึ้น 2.5%[1] เพื่อตอบสนองการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ทางเลือกหนึ่งคือเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักร ในภาคอุตสาหกรรมนั้น มีเครื่องจักรต่าง ๆ มากมายหลากหลายรูปแบบการทำงาน และวัตถุประสงค์ ซึ่งการทำงานส่วนใหญ่มักจะมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องและหนึ่งในเครื่องจักรที่ทำงานกับความร้อนและใช้กันอย่างแพร่หลายคือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีหลายรูปแบบเมื่อแบ่งตามการใช้งานและของไหลที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มประสิทธิภาพ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถช่วยลดขนาด ขนาดและค่าดำเนินการของอุปกรณ์ได้ เทคนิคทางวิศวกรรมที่นิยมนำมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนคือการสร้างรูปแบบการไหลปั่นป่วนโดยการวางตัวสร้างความปั่นป่วนปั่นป่วน เช่น baffles [2-7, 9-10], ribs [8, 11-13], หรือ blockages [14] ไว้ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตามการใช้ ตัวสร้างความปั่นป่วน ในการช่วยเพิ่มการถ่ายโอนความร้อน ระบบจะมีการสูญเสียแรงดันขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการหา รูปแบบทางกายภาพของ ตัวสร้างความปั่นป่วน ที่เหมาะสมที่จะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้สูงและลดอัตราการสูญเสียแรงดันของระบบ การหารูปแบบที่เหมาะสมเพื่อเกิดค่าประสิทธิภาพสูงสุดมีปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการไหลคือ

CST-02

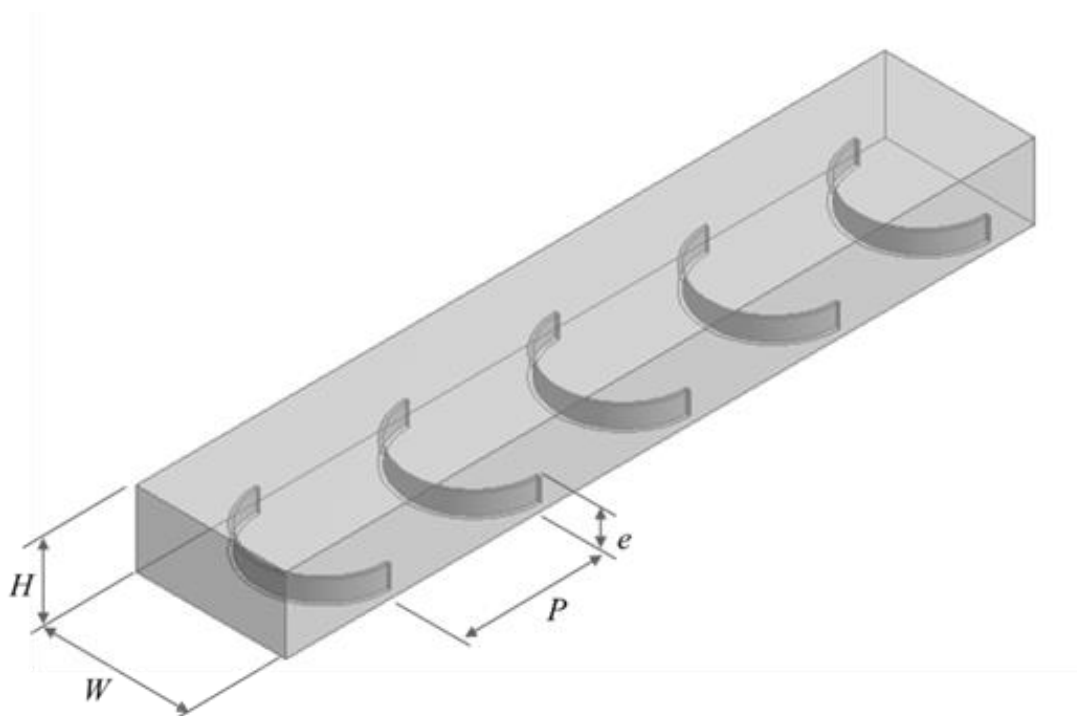
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	area of absorber plate (m^2)
C_p	specific heat of air ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D_h	hydraulic diameter of duct (m)
e	high of roughness element (m)
BR	relative roughness high (-)
f	average friction factor of roughened duct (-)
f_0	average friction factor of smooth duct (-)
H	height of the duct (m)
h	convective heat transfer coefficient ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
k	thermal conductivity of air ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)
L	test length (m)
$\dot{m}$	mass flow rate of air (kg s^{-1})
Nu	average Nusselt number of roughened duct (-)
Nu_0	average Nusselt number of smooth duct (-)
P	pitch length (m)
PR	relative roughness pitch (-)
q	rate of heat transfer to air (W)
Re	Reynolds number (-)
t_i	average inlet temperature of air ($^{\circ}\text{C}$)
t_o	average outlet temperature of air ($^{\circ}\text{C}$)
t_f	average temperature of fluid ($^{\circ}\text{C}$)
t_s	average temperature of plate ($^{\circ}\text{C}$)
u	velocity of air in the duct (m s^{-1})
W	width of the duct (m)
สัญลักษณ์กรีก	
Δp	pressure drop in the test length (Pa)
ρ	density of air (kg m^{-3})
μ	viscosity ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)

รูปทรงตัวสร้างความเป็นป่วน, รูปแบบการวางตัวสร้างความเป็นป่วน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถศึกษาและเข้าใจได้โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สำหรับตัวสร้างความเป็นป่วนแบบ baffle และ rib ในท่อสี่เหลี่ยมมีงานวิจัยที่คัดค้านมาหลายหลายรูปแบบ

Sripattanapipat และ Promvonge [2] ศึกษาการไหลแบบราบเรียบผ่านตัวสร้างความเป็นป่วน diamond baffles และสรุปได้ว่าตัวสร้างความเป็นป่วนแบบ diamond baffles ที่มีมุมกึ่งกลางที่ 5-10 องศาทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าแบบแผ่นกั้นสี่เหลี่ยม Promvonge และคณะ [3] นำเสนอแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบในท่อสี่เหลี่ยมโดยมีตัวสร้างความเป็นป่วน 45° baffle ว่าถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าตัวสร้างความเป็นป่วนแบบ 90° baffle. Promvonge และคณะ [4] ได้ทำการสร้างแบบจำลองการไหลเพื่อศึกษาการถ่ายโอนความร้อนระหว่างแผ่นกั้น 45° กับ 90° baffle โดยติดตั้งไวบนผนังทั้งบนและล่าง พบว่าแผ่นกั้น 45° มีการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่า 90° baffle Promvonge [5] ทดลองตัวสร้างความเป็นป่วน multiple 60° V-baffles พบว่า V-baffles เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดส่วนความสูงของตัวสร้างความเป็นป่วน มีค่าสูงและสัดส่วน pitch ต่ำ Promvonge และ Kwankaomeng [6] ศึกษาการสร้างการไหลปั่นป่วนโดยมีตัวสร้างความเป็นป่วน 45° staggered V-baffles พบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ 100-1,100% เมื่อเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมที่มีพื้นเรียบแต่การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นถึง 90 เท่า ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 2.75 Kwankaomeng และ Promvonge [7] เสนอรูปแบบของตัวสร้างความเป็นป่วนแบบแผ่นเรียบที่ทำมุม 30° กับทางเข้าบนผนังเดียวผ่านการแบบจำลองการไหลพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 100-923%. Wei Peng และคณะ [8] ทดลองการถ่ายเทความร้อนแบบการพา (Convection) ในท่อสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะของตัวสร้างความเป็นป่วนที่แตกต่างกัน 2 แบบคือแบบแผ่นตั้งฉาก กับแบบ V-shape ซึ่งได้ทำการศึกษากับการไหลแบบปั่นป่วน พบว่ารูปแบบตัวสร้างความเป็นป่วนชนิด 45° V-shape แบบ ribs ต่อเนื่อง เป็นรูปแบบที่ดีที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน Promvonge และคณะ [9] ได้ศึกษาการไหลแบบราบเรียบในท่อสี่เหลี่ยมที่มีตัวสร้างความเป็นป่วนแบบ V-baffled ผ่านแบบจำลองการไหลใน 3 มิติ พบว่าตัวสร้างความเป็นป่วนแบบ V-baffle ที่ถูกติดตั้งบนท่อสี่เหลี่ยมทั้งด้านบนและล่างนั้น มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่มุม 45° . Sriromreun และคณะ [10] เสนอผลการทดลองของตัวสร้างความเป็นป่วนแบบ Z-shaped baffles ในท่อสี่เหลี่ยม พบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

CST-02



รูปที่ 1 แบบจำลองท่ออากาศพร้อมตัวสร้างความปั่นป่วนที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นที่ 2 เมตร และความสูง 0.3 เมตร

สูงสุดอยู่ที่ 2.2 ที่ค่า Reynolds number ต่ำสุด Xin-Yi Tang และ Dong-Sheng Zhu [11] ศึกษาแบบจำลองการไหลที่มีการจัดวางตัวสร้างความปั่นป่วนที่ต่างกัน พบว่า 30° V-type array เป็นรูปแบบการจัดวางที่ดีที่สุดซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 90% เมื่อเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบ

การทบทวนวรรณกรรมดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการออกแบบตัวสร้างความปั่นป่วนนั้นเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม จากเนื้อหาในวรรณกรรมเท่าที่สืบค้นได้ข้างต้น การศึกษาการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยตัวสร้างความปั่นป่วนรูปทรงครึ่งวงกลมยังไม่เป็นที่ปรากฏ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษเชิงการคำนวณเพื่อเปรียบผลกับการออกแบบรูปทรงตัวสร้างความปั่นป่วนโดยวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหารูปทรงของตัวสร้างความปั่นป่วนที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้จริงและการได้มาซึ่งแนวทางในการนำแบบจำลองเชิงตัวเลขไปใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ซึ่งจะเป็นงานในขั้นตอนต่อไป

2. แบบจำลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

2.1 ลักษณะและการเรียงตัวของตัวสร้างความปั่นป่วน

ลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ศึกษาการออกแบบเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้ใช้ท่อสี่เหลี่ยมที่มีสัดส่วนความกว้างเป็น 2 เท่ากับความสูง โดยพื้นด้านล่างของท่อจะเป็นบริเวณที่ติดตั้งตัวสร้างความปั่นป่วนดังรูปที่ 1 ซึ่งลักษณะของตัวสร้างความปั่นป่วนจะเป็นรูปครึ่งวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 0.85 เมตร หนา 0.05 เมตร โดยในการศึกษาอากาศจะไหลเข้าด้วยมวลคงที่ที่อุณหภูมิเข้า T_i ไหลผ่านตัวสร้างความปั่นป่วนจำนวน 5 ตัวที่มีความสูง 0.1-0.3 เมตร และระยะห่างระหว่างตัวสร้างความปั่นป่วน 1-2 เมตร

2.2 เงื่อนไขขอบเขต

อากาศไหลเข้าและออกด้วยมวลคงที่ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน โดยอากาศบริเวณผนังของท่ออากาศไม่เกิดการไถล (No slip wall) บริเวณพื้นท่ออากาศมีอุณหภูมิคงที่ที่ 310 เคลวิน และผนังท่อทั้งด้านข้างและด้านบนรวมถึงแผ่นตัวสร้างความปั่นป่วนจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนออกไปภายนอกท่อ

CST-02

3. สมการการคำนวณ

3.1 สมการการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

สมการสำหรับการคำนวณการไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยม ได้มาภายใต้สมมติฐานดังนี้

- การไหลและการถ่ายเทความร้อนคำนวณแบบไม่ขึ้นกับเวลา (Steady State)
- การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบและของไหลไม่สามารถอัดตัวได้
- คุณสมบัติของของไหลคงที่
- ไม่คิดแรงเนื่องจากน้ำหนักและความหนืด
- ไม่คิดการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี

จากสมมติฐานทั้งหมด สมการการคำนวณของของไหลจะมีสมการทั้งหมดอยู่ 3 สมการประกอบด้วยสมการความต่อเนื่อง, สมการเนเวียร์-สโตกส์ และสมการพลังงาน โดยสมการจะถูกคำนวณอยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ดังนี้

สมการต่อเนื่อง :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม :

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

สมการพลังงาน :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

เมื่อ Γ คือ Thermal diffusivity มีรูปสมการดังนี้

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \quad (4)$$

สมการพลังงานจะถูกใช้การแก้สมการแบบ QUICK scheme และสมการ governing equations จะใช้การแก้แบบ second order upwind ผสมกับ SIMPLE algorithm และคำนวณโดยวิธีทาง finite volume (ANSYS Fluent) [16] สมการจะหยุดคำนวณเมื่อค่า normalized residual value มีค่าต่ำกว่า 10^{-5} สำหรับทุกสมการยกเว้นสมการพลังงานจะต้องต่ำกว่า 10^{-9}

3.2 สมการการคำนวณข้อมูลทางความร้อน

งานวิจัยนี้ใช้อากาศเป็นของไหลเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน ในสภาวะการถ่ายเทความร้อนที่คงที่ ความร้อนที่อากาศได้รับจะมีค่าเท่ากับความร้อนที่สูญเสียไปจากผนังท่อแลกเปลี่ยนความร้อนดังสมการ :

$$Q_{air} = Q_{conv} \quad (5)$$

ความสามารถในการพาความร้อนของอากาศมีสมการเป็น

$$Q_{air} = \dot{m} C_{p,air} (t_o - t_i) = VI - \text{heat losses} \quad (6)$$

โดยสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจากผนังท่อและสมการ Nusselt number สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_{conv} = hA(t_s - t_f) \quad (7)$$

$$Nu = hD_h/k \quad (8)$$

เมื่อ t_f คือ อุณหภูมิของของไหลเฉลี่ย มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$t_f = (t_o + t_i)/2 \quad (9)$$

สมการ Reynolds number หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (10)$$

Friction factor, f คำนวณจาก Pressure drop, ΔP ตามความยาวของช่องทางการไหล L ดังนี้

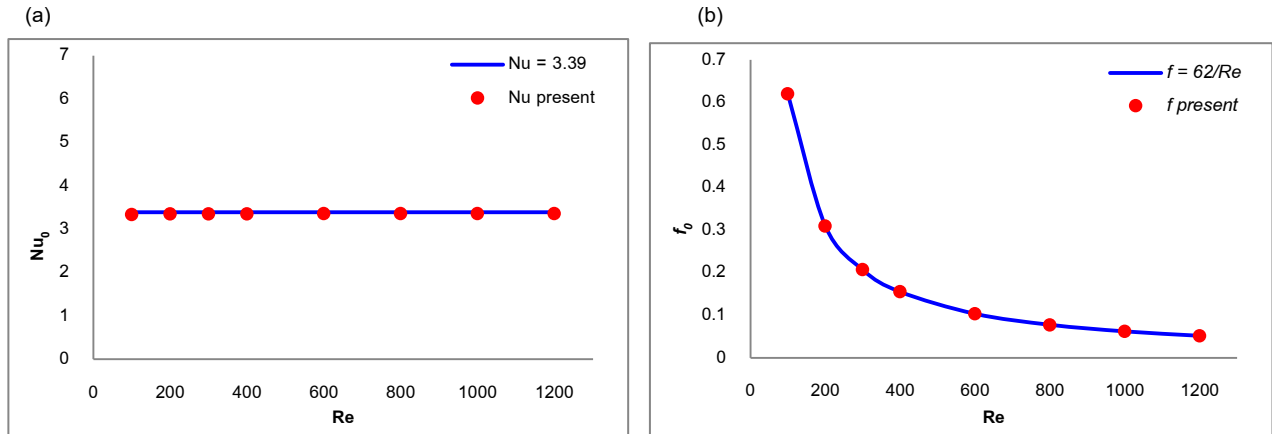
$$f = 2 \frac{\Delta P}{L} \left(\frac{D_h}{\rho u^2} \right) \quad (11)$$

แฟกเตอร์การเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อน (η) คือสัดส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวอุปกรณ์ทดสอบ h กับพื้นผิวเรียบ, h_o , ณ ตำแหน่งที่ pumping power มีค่าเท่ากัน สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\eta = \frac{Q_{air}}{W_{pump}} = \frac{h}{h_o} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nu_o} \bigg|_{pp} = \frac{Nu/Nu_o}{(f/f_o)^{1/3}} \quad (12)$$

เมื่อ Nu_o และ f_o คือ Nusselt number และ friction factor บนพื้นผิวเรียบตามลำดับ

CST-02



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่า (a) Nusselt number และ (b) และ friction factor ระหว่างผลเฉลยจากวรรณกรรมกับงานวิจัย

4. ผลการคำนวณจากแบบจำลองเชิงตัวเลข

4.1 การทดสอบเครื่องมือคำนวณ

เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือคำนวณ ได้ทำการทดสอบการจำลองการไหลในท่อเรียบ แบบจำลองเชิงตัวเลขของท่อผิวเรียบที่มีสัดส่วนพื้นที่หน้าตัดความกว้างต่อความสูงเป็น 2 ผลเฉลยจะถูกเปรียบเทียบภายใต้สภาวะการทำงานที่คล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 2a และ b ผลเฉลยในงานวิจัยพบว่าค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ได้รับจากวรรณกรรม [15] สำหรับค่า Nusselt number และ friction factor บนพื้นผิวเรียบจะมีค่าการเบี่ยงเบนอยู่ไม่เกิน $\pm 0.25\%$ สำหรับผลเฉลยของค่า Nusselt number และ friction factor บนพื้นผิวเรียบโดยมีการไหลแบบราบเรียบในท่อสี่เหลี่ยมที่มีสัดส่วนพื้นที่หน้าตัดความกว้างต่อความสูงเป็น 2 และมีอุณหภูมิผิวท่อคงที่มีสมการดังนี้ [15]:

$$Nu_0 = 3.39 \quad (13)$$

$$f_0 = 62/Re \quad (14)$$

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อ $PR = 2$ $BR = 0.3$ และมีค่า Reynolds number เป็น 1200 โดย PR และ BR สามารถหาได้จากระยะห่างระหว่างตัวสร้างความปั่นป่วนและความสูงของตัวสร้างความปั่นป่วนหารด้วยความสูงของท่ออากาศ และได้ทำการวิเคราะห์การไหลแบบคอนจูเกตโดยใช้แบบจำลอง laminar และ turbulent (k-omega) จากผลการคำนวณพบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันน้อย

มาก ด้วยเหตุนี้จึงใช้แบบจำลองการไหล laminar ในการศึกษาครั้งนี้ เพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 1 ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองแบบราบเรียบและปั่นป่วน

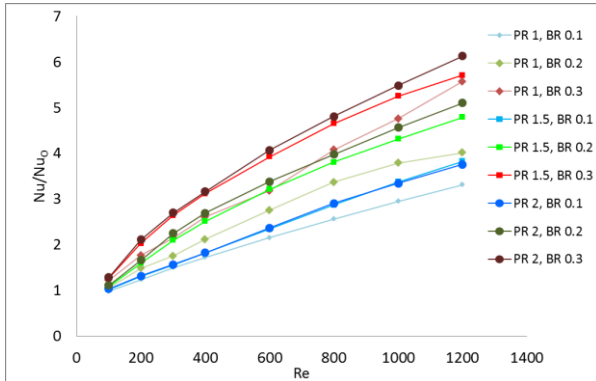
Model	Nu/Nu_0	f/f_0	TEF	% Error
Laminar	6.12674	5.53325	3.46393	0
Turbulent (k- ω)	6.35372	5.94742	3.50686	1.23936

4.2 การถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 3 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของค่า Nusselt number ในแต่ละระยะห่างและความสูง จะเห็นว่าเมื่อความสูงของแผ่นเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศได้ดีขึ้นและระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ไม่เกิดการไหลวนที่มากเกินไปซึ่งทำให้อากาศไหลได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิถูกพาไปด้วยอากาศได้ง่ายขึ้นและต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่า Nusselt number เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงและระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 แล้วจะเห็นว่าความสูงของตัวสร้างความปั่นป่วนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนมากกว่าระยะห่างระหว่างตัวสร้างความปั่นป่วน ซึ่งที่สัดส่วนความสูง 0.3 การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 1.2 - 6.1 เท่าของท่อผิวเรียบที่ไม่ได้ติดตั้งตัว

CST-02

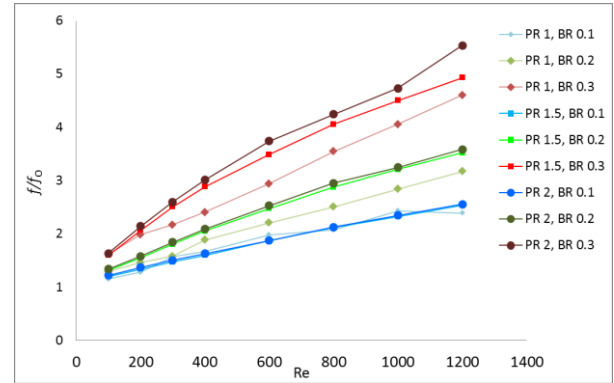
สร้างความปั่นป่วน อย่างไรก็ตามถ้าระยะห่างระหว่างตัวสร้างความปั่นป่วนที่มากเกินไปก็จะส่งผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่นเดียวกับความสูงของตัวสร้างความปั่นป่วน หากมีความสูงที่สูงเกินไปจะเกิดการสูญเสียแรงดันของของไหลทำให้ของไหลไหลในท่อได้ยากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานปั๊มมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3 ค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน Nu/Nu_0 กับ Reynolds number สำหรับทุก ๆ ความสูงและระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วน

4.3 การสูญเสียแรงดัน

จากรูปที่ 4 แสดงถึงอัตราส่วนของแรงเสียดทานของระบบเทียบกับท่อผิวเรียบของแต่ละระยะห่างและความสูงของตัวสร้างความปั่นป่วน จะเห็นได้ว่าเช่นเดียวกับการถ่ายเทความร้อน ความสูงของตัวสร้างความปั่นป่วนจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานชัดเจน ในขณะที่ระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วนจะมีผลเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงเดียวกัน ในทุก ๆ ค่า Reynolds number เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 เห็นผลว่าแรงเสียดทานของระบบเนื่องจากตัวสร้างความปั่นป่วนสูงสุดที่ 5.5 เท่าของท่อผิวเรียบที่สัดส่วนระยะห่างระหว่างตัวสร้างความปั่นป่วนเท่ากับ 2 และสัดส่วนความสูงของแผ่นตัวสร้างความปั่นป่วนเป็น 0.3 ที่ค่า Reynolds number เท่ากับ 1200 ซึ่งโดยรวมแล้วในทุกค่าสัดส่วนของความสูงและระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราส่วนแรงเสียดทานสูงขึ้น

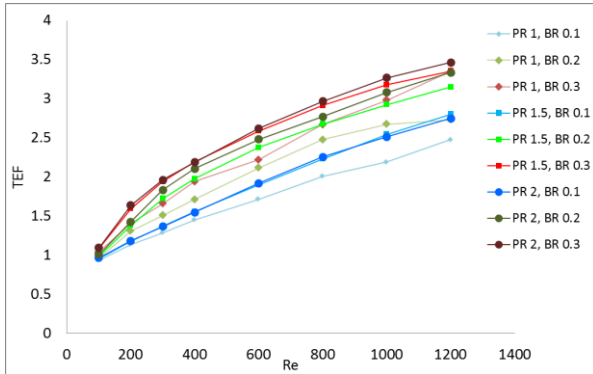


รูปที่ 4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน f/f_0 กับ Reynolds number สำหรับทุก ๆ ความสูงและระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วน

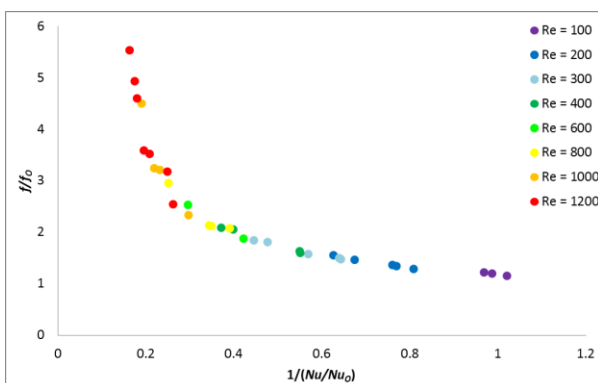
4.4 ประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 5 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแต่ละระยะห่างและความสูงของตัวสร้างความปั่นป่วน จะเห็นได้ว่าความสูงของตัวสร้างความปั่นป่วนจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนชัดเจนกว่าระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วน ในทุก ๆ ค่า Reynolds number เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 เห็นผลว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเนื่องมาจากตัวสร้างความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น 1 ถึง 3.4 เท่าของท่อผิวเรียบในทุกค่าความสูงและระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ผลของตัวสร้างความปั่นป่วนที่สัดส่วนความสูง 0.3 และสัดส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นเป็น 2 จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 1 ถึง 3.4 เท่าตามการเปลี่ยนแปลงของค่า Reynolds number อย่างไรก็ดีเมื่อนำข้อมูลมาแสดงผลโดยใช้วิธีการหา non-dominated solutions ดังรูปที่ 6 พบว่ามีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ค่า PR และ BR บางค่าเท่านั้นที่เป็น non-dominated solutions ซึ่งจะเป็น solutions ที่ไม่ด้อยกว่าตัวอื่นหากพิจารณาตัวชี้วัด Nu และ f พร้อมกัน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้นได้ในค่า Reynolds number ที่สูงขึ้นแต่ในขณะเดียวกันเห็นได้ว่าตัวสร้างความปั่นป่วนที่มีสัดส่วนความสูงของแผ่นและสัดส่วนระยะห่างน้อย จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวสร้างความปั่นป่วนที่มีสัดส่วนความสูงของแผ่นและสัดส่วนระยะห่างมากในค่า Reynolds number ที่ผกผันกัน

CST-02



รูปที่ 5 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนกับ Reynolds number สำหรับทุกๆ ความสูงและระยะห่างของตัวสร้างความปั่นป่วน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน f/f_0 และส่วนกลับอัตราส่วน Nu/Nu_0 โดยอิงจากค่า Reynolds number

5.สรุป

การออกแบบตัวสร้างความปั่นป่วนสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนท่อสี่เหลี่ยมนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวสร้างความปั่นป่วนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยงานวิจัยจะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพจากตัวสร้างความปั่นป่วนแบบแผ่นโค้งครึ่งวงกลมในท่อสี่เหลี่ยมที่มีสัดส่วนหน้าตัดความกว้างเป็น 2 เท่าต่อความสูง ซึ่งผลการคำนวณออกมาได้ผลว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 120 ถึง 610% ดังรูปที่ 3 ในขณะที่การสูญเสียแรงดันเพิ่มขึ้น 100 ถึง 550% จากท่อผิวเรียบ ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 100 ถึง 340% จากท่อผิวเรียบ ดังรูปที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของตัวสร้างความปั่นป่วนกับตัวสร้างความปั่นป่วนรูปทรง V [6] ที่มีสัดส่วนความสูง 0.2 และสัดส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นเป็น 1 พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวสร้างความปั่นป่วนรูปทรงครึ่งวงกลมที่มีสัดส่วนความสูง 0.3 และสัดส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นเป็น 2 จะดีกว่า 20% อย่างไรก็ตาม เมื่อนำข้อมูลมา

แสดงผลโดยใช้วิธีการหา non-dominated solutions ดังรูปที่ 6 หากพิจารณาตัวชี้วัด Nu และ f พร้อมกันพบว่าค่า Reynolds number มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยจะทำให้ตัวสร้างความปั่นป่วนที่มี PR และ BR น้อยมีความคุ้มค่าในการใช้เทียบเท่ากับตัวสร้างความปั่นป่วนที่มี PR และ BR มากในค่า Reynolds number ที่ผกผันกัน

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.จุฬาร เบญจปิยะพร ผู้ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย และมหาวิทยาลัยขอนแก่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้โอกาสในการศึกษาและสนับสนุนทั้งด้านโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS Fluent ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และการทำกิจกรรมต่างๆทางด้านวิชาการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). การใช้พลังงานปี 56 ขยายตัว 1.2%, แหล่งที่มา :<http://webkc.dede.go.th/testmax/node/252>, เข้าดูเมื่อวันที่ 01/10/2557.
- [2] S. Sripattanapipat, and P. Promvonge. (2008). Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.36, pp. 32-38.
- [3] P. Promvonge, S. Sripattanapipat, S. Tamna, S. Kwankaomeng, and C. Thianpong. (2009). Numerical investigation of laminar heat transfer in a square channel with 45° inclined baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.37, pp. 170-177.
- [4] P. Promvonge, S. Sripattanapipat, and S. Kwankaomeng. (2010). Laminar periodic flow and heat transfer in square channel with 45° inline baffles on two opposite walls. *International Journal of Thermal Sciences*, vol.49, pp. 963-975.
- [5] P. Promvonge. (2010). Heat transfer and pressure drop in a channel with multiple 60° V-baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.37, pp. 835-840.
- [6] P. Promvonge, and S. Kwankaomeng. (2010). Periodic laminar flow and heat transfer in a channel

CST-02

- with 45° staggered V-baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.37, pp. 841-849.
- [7] S. Kwankaomeng, and P. Promvonge (2010). Numerical prediction on laminar heat transfer in square duct with 30° angled baffle on one wall. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.37, pp. 857-866.
- [8] Wei Peng, Pei-Xue Jiang, Yang-Ping Wang, and Bing-Yuan Wei. (2011). Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in channels with different types of ribs. *Applied Thermal Engineering*, vol.31, pp. 2702-2708.
- [9] P. Promvonge, W. Jedsadaratanachai, S. Kwankaomeng, and C. Thianpong. (2011). 3D simulation of laminar flow and heat transfer in V-baffled square channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.39, pp. 85-93.
- [10] P. Sriromreun, C. Thianpong, and P. Promvonge. (2012). Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.39, pp. 945-952.
- [11] Xin-Yi Tanga, and Dong-Sheng Zhub. (2013). Flow structure and heat transfer in a narrow rectangular channel with different discrete rib arrays. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol.69, pp. 1-14.
- [12] S. Skullong, S. Kwankaomeng, C. Thianpong, and P. Promvonge. (2013). Thermal performance of turbulent flow in a solar air heater channel with rib-groove turbulators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.50, pp. 34-43.
- [13] P.Promvonge, C.Khanokniyakarn, S.Kwankaomeng, and C. Thianpong. (2011). Thermal behavior in solar air heater channel fitted with combined rib and delta-winglet. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.38, pp. 749-756.
- [14] T. Alam, R.P. Saini, and J.S. Saini. (2014). Effect of circularity of perforation holes in V-shaped blockages on heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct. *Energy Conversion and Management*, vol.86, pp. 952-963.
- [15] F. Incropera, P.D. Dewitt, (2006). *Introduction to Heat Transfer*, 5th edition John Wiley & Sons.
- [16] S.V. Patankar, (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.