

การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศใน
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหม้อท่อติดครีบ
Numerical Simulation of Air Flow and Heat Transfer in Finned-Tube Heat
Exchanger

ฉวีภา ธารีสาร¹, วีรชัย ชัยวรพฤษ² และ ขวลิต กิตติชัยการ^{2*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

*E-mail: fengclk@ku.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02-797-0999 ต่อ 1802, เบอร์โทรสาร 02-579-4576

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไหลของอากาศภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้สำหรับการหล่อเย็นใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหล – Fluent ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ อากาศถูกใช้เป็นตัวพาความร้อนจากหม้อท่ออุณหภูมิสูงที่อยู่ด้านล่าง ไปสู่หม้อท่ออุณหภูมิต่ำที่อยู่ด้านบน ในการจำลองการไหล อากาศจะไหลสู่ด้านบนด้วยความเร็วที่ทางเข้าเท่ากับ 2.4 เมตรต่อวินาที โดยมีการใช้วัสดุรูพรุนมาแทนที่หม้อท่อและครีบระบายความร้อนเพื่อลดทรัพยากรในการคำนวณ จากผลการศึกษาพบว่ามีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศที่ทางออกเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเท่ากับ 4.8 % นอกจากนี้ในการศึกษา ยังได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในตัวเครื่องด้วยการติดตั้งช่องการไหลนาร่องเพื่อจัดระเบียบการไหลของอากาศในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ระยะห่างจากแนวกึ่งกลางเท่ากับ $D/12$, $2D/12$ และ $3D/12$ โดยแต่ละระยะห่างจะมีการเอียงช่องทางไหลนาร่องเป็นมุม 15° , 30° และ 45° จากผลการวิเคราะห์พบว่าช่องทางไหลนาร่องที่ระยะ $D/12$ และมุม 15° ทำให้อากาศสามารถพาความร้อนจากหม้อท่อร้อนมาที่หม้อท่อเย็นได้มากที่สุด ซึ่งจากผลการวิเคราะห์นี้จะนำไปสู่การออกแบบช่องทางไหลนาร่องในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

คำหลัก: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน; การแลกเปลี่ยนความร้อน; หม้อท่อติดครีบ

Abstract

This research focuses on a study of an air flow inside heat exchanger for a gas turbine cooling using the commercial computational fluid dynamics program – Fluent. In this heat exchanger, the air is used to transfer the heat from the hot lower tube banks to the cold upper tube bundle. The air flows in upward direction with the velocity of 2.4 m/s at the inlet. In the simulation, the porous media was employed instead of the fin-tubes to decrease the computing resource. From the obtained results, it has been shown that there was a difference of 4.8 % in the outlet temperature comparing with the experimental measurement. Furthermore, to improve the efficiency of heat exchanger, the inlet guide vane was installed at the distance of $D/12$, $2D/12$, and $3D/12$ from a central line. At each distance, the guide vane was inclined by the angle of 15° , 30° and 45° . The results show that the guide vane at the distance of $D/12$ and angle of 15° give the maximum convective heat transfer from the hot lower tube banks to the cold upper tube bundle. These results can lead to the better design of the guide vane installed in finned-tube heat exchanger to have a higher efficiency in the future.

Keywords: Computational fluid dynamics; heat exchanger; heat transfer; finned-tubes

1. บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบ (Fin-Tube Heat Exchanger) เป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมทั่วไป โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้ จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น โดยไม่ทำให้ของไหลทั้งสองไหลปนกัน เมื่อของไหลชนิดหนึ่งไหลในท่อ ของไหลอีกชนิดจะไหลผ่านท่อด้านนอก ที่ด้านนอกของท่อนี้จะมีการติดตั้งครีบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามครีบที่ถูกติดตั้งจะก่อให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการไหลอย่างมหาศาล เพราะว่าครีบเหล่านี้เป็นตัวกีดขวางเส้นทางการไหลของของไหลด้านนอกนั่นเอง อีกทั้งของไหลที่ไหลผ่านท่อด้านนอกเหล่านี้เกิดจากการสร้างแรงดันจากพัดลม ทำให้การไหลของของไหลนี้มีทิศทางที่ไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ โดย [1] พบว่าลักษณะการไหลของอากาศด้านนอกท่อที่ไม่เป็นระเบียบนี้ ก่อให้เกิดการกระจายอุณหภูมิของอากาศด้านนอกจากท่อที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าลดลง [1] โดยจะลดลงต่ำกว่าปกติถึง 30 % ถ้าอากาศที่ไหลเข้ามีความปั่นป่วนสูง [2], [3] ดังนั้นการจัดระเบียบการไหลของอากาศที่เข้าสู่หม้อท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบ จึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการกระจายอุณหภูมิในช่องทางไหลขาออก โดยใช้พลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็นกระบวนการและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่มีความสามารถในการทำนายลักษณะการไหลของของไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างแม่นยำ [4], [5] เมื่อมีแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้พลศาสตร์ของไหลเป็นเครื่องมือช่วยออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูงโดยที่ไม่ต้องสร้างชิ้นงานมาทดสอบจริง [6] ซึ่งจะทำให้ประหยัดทั้งเวลาและเงินทุนอย่างมหาศาล ดังนั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศผ่านหม้อท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบจึงถูกศึกษาโดยการ

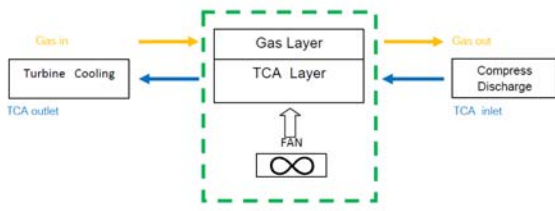
ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบจำลองที่ถูกสอบเทียบความแม่นยำกับผลการทดลองจริง อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังศึกษาผลกระทบของการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง (Guide vanes) ที่ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ต่อความสามารถในการพาความร้อนของอากาศ โดยผลที่ได้จากการคำนวณนี้ จะถูกแสดงในรูปของลักษณะการไหลของอากาศ, การกระจายอุณหภูมิ, อุณหภูมิเฉลี่ยด้านทางออกและความดันสูญเสีย เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบช่องทางไหลนำร่องในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

2. การจำลองการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

งานวิจัยนี้มีการนำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบ ดังแสดงในรูปที่ 1 มาใช้ศึกษาการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent โดยมีลักษณะการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2 ในการจำลองการไหลจะได้อากาศซึ่งมีความเร็วที่ทางเข้า 2.4 เมตรต่อวินาที ไหลผ่านช่องทางไหลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง, D เท่ากับ 3.85 เมตร ไหลผ่านหม้อท่อร้อนที่อยู่ด้านล่างสู่หม้อท่อเย็นที่อยู่ด้านบน โดยหม้อท่อเหล่านี้จะมีการติดตั้งครีบ ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบจำลองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกสร้างโดยการใช้โปรแกรม SolidWorks ดังแสดงในรูปที่ 4



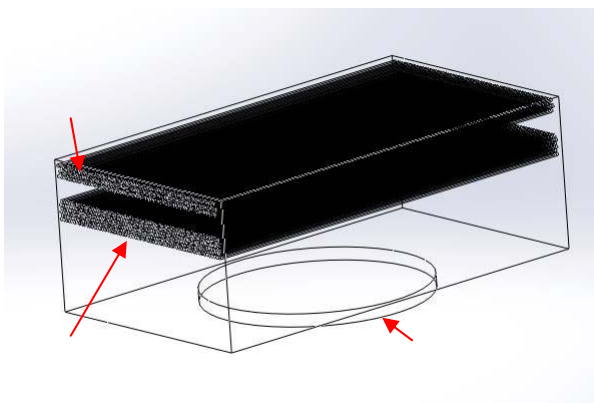
รูปที่ 1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2 รูปแบบการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานวิจัยนี้



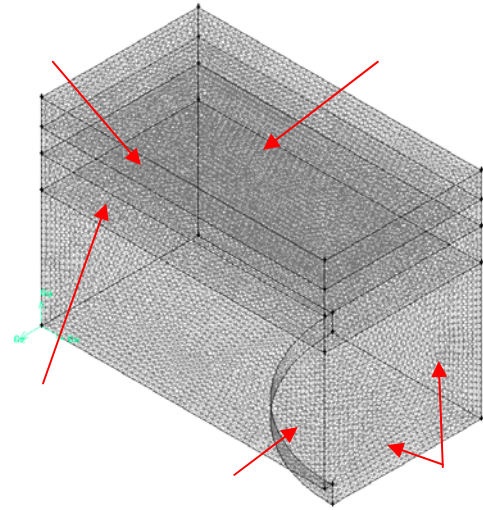
รูปที่ 3 หมู่อัดคียบ



รูปที่ 4 แบบจำลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากรูปที่ 5 ด้านทางเข้าถูกกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต (Boundary condition) ให้เป็นความเร็วด้านทางเข้า (Velocity inlet) มีค่าเท่ากับ 2.4 เมตรต่อวินาที และมีอุณหภูมิเท่ากับ 304.55 K ที่ขอบเขตด้านบน กำหนดให้เป็นความดันด้านทางออก (Pressure outlet) มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ผิวสมมาตรทั้งสองด้าน ถูกกำหนดให้เป็นแบบ Symmetry โดยตาข่ายข้อมูลที่ใช้เป็นแบบสามเหลี่ยม (Tetrahedral element) โดยใช้การสร้างแบบไม่คงตัวที่มีขนาดของตาข่ายข้อมูลเท่ากับ 15 ที่ผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจนถึงขนาด 120 โดยมีอัตราการขยายจากพื้นผิวเท่ากับ 1.2

แบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Standard k-ε และกำหนดค่า Spatial discretization ทั้งหมดให้เป็นแบบ Second order upwind ยกเว้น Gradient กำหนดให้เป็น Least squares cell based โดยการคำนวณเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้จะหยุดก็ต่อเมื่อทุกตัวแปรมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคำนวณเท่ากับ 0.0001



รูปที่ 5 ตาข่ายข้อมูลแบบสามเหลี่ยม เมื่อใช้วัสดุพอร์นแทนที่หมู่อัดคียบ

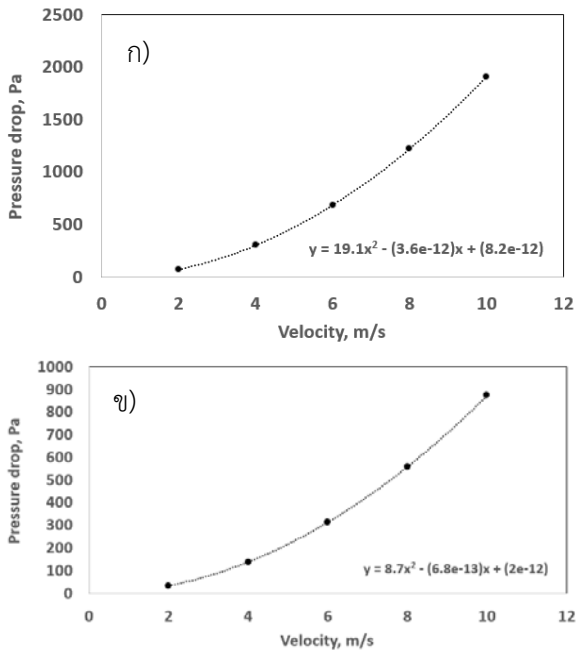
หมู่อัดคียบ

หมู่อัดคียบร้อนจะถูกกำหนดให้มีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ $+676,246.3 \text{ w/m}^3$ และหมู่อัดคียบมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ $-328,961.2 \text{ w/m}^3$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองจริง ในงานวิจัยนี้มีการใช้วัสดุพอร์นมาแทนที่หมู่อัดคียบและอธิบายความหมายเพื่อลดทรัพยากรในการคำนวณ โดยสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุพอร์นคือ Inertial resistance factor, C และ Viscous inertial resistance factor, $1/\alpha$ ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว, v และความดันสูญเสีย, ΔP คือ

$$\Delta P = 0.5\rho C(\Delta n)v^2 + (\mu/\alpha)(\Delta n)v \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
 Δn คือ ความหนาของวัสดุพอร์น (m)
 μ คือ ความหนืดของอากาศ (kg/ms)

การศึกษาการไหลของอากาศผ่านหม้อต้มจะมีการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันสูญเสียของหม้อต้มร้อนและหม้อต้มเย็นดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากสมการที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุพูนจะสามารถหาค่าได้ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันสูญเสียของ (ก) หม้อต้มร้อนและ (ข) หม้อต้มเย็น

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุพูน

ตัวแปร	หม้อต้มร้อน	หม้อต้มเย็น
C	54.83	31.14
$1/\alpha$	$6e-8$	$1.2e-7$

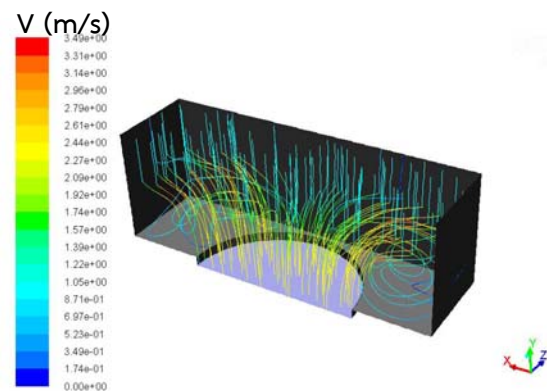
งานวิจัยนี้มีการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุณหภูมิที่ถุกวัดจริง, $T_{O,EXP}$ และอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข, $T_{O,CFD}$ พบว่ามีค่าแตกต่างกัน 4.8 % ดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิด้านออกจากหม้อต้มร้อน, $T_{Oh,CFD}$ ที่ถูกคำนวณได้มีค่าเท่ากับ 546.9 K ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแปร	ค่าที่วัดได้
$T_{O,EXP}$ (K)	476

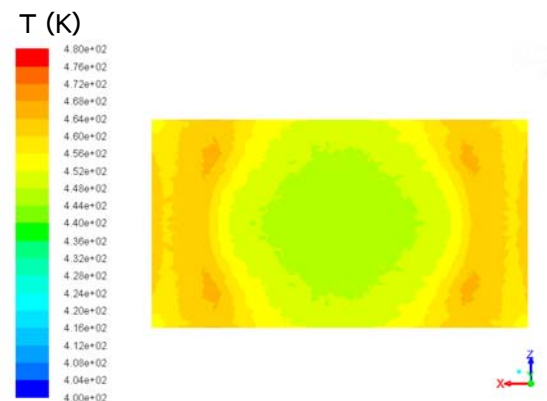
$T_{O,CFD}$ (K)	454.2
ค่าความแตกต่าง (%)	4.8
$T_{Oh,CFD}$ (K)	546.9

3 ผลการวิเคราะห์การไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งแถบสีแสดงถึงค่าความเร็วของอนุภาคอากาศ พบว่าอนุภาคของอากาศมีความเร็วที่บริเวณกึ่งกลางทางออกเท่ากับ 0.95 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณโดยรอบส่งผลให้อากาศที่ตรงกลางมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับหม้อต้มน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณโดยรอบ ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกตรงกลางมีค่าประมาณ 445 K ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณโดยรอบที่มีค่าเท่ากับ 465 K ดังแสดงในรูปที่ 8



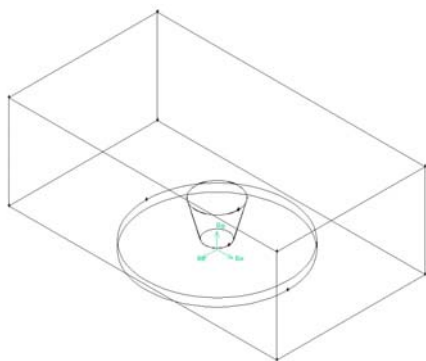
รูปที่ 7 แสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



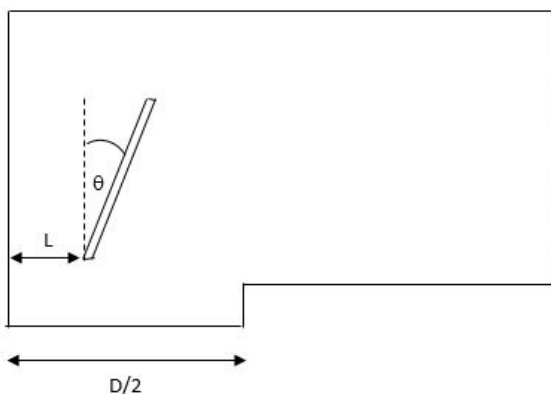
รูปที่ 8 แสดงการกระจายอุณหภูมิของอากาศที่ทางออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

4 ผลการวิเคราะห์การไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลังติดตั้งช่องทางการไหลนำร่อง

รูปที่ 9 แสดงช่องทางการไหลนำร่องที่ถูกติดตั้งเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยช่องทางการไหลนำร่องนี้มีลักษณะเป็นรูปกรวยคว่ำหัวตัดและมีความหนา 3 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 1 เมตร ในงานวิจัยนี้จะมีการศึกษาผลกระทบของมุมเอียง, θ และระยะห่างจากแนวกึ่งกลาง, L ต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนดังแสดงในรูปที่ 10 โดยจะติดตั้งช่องทางการไหลนำร่องที่ระยะห่างจากแนวกึ่งกลางเท่ากับ $D/12$, $2D/12$ และ $3D/12$ และแต่ละระยะห่างจะมีการเอียงช่องทางการไหลนำร่องเป็นมุม 15° , 30° และ 45°



รูปที่ 9 การติดตั้งช่องทางการไหลนำร่องในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีป



รูปที่ 10 ตำแหน่งการติดตั้งช่องทางการไหลนำร่อง

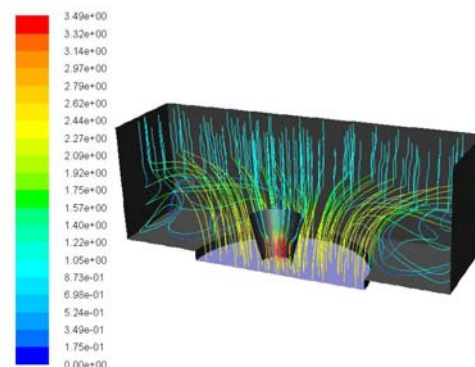
หลังการติดตั้งช่องทางการไหลนำร่องพบว่าอุณหภูมิที่ทางออกโดยรวมมีค่าเท่ากับก่อนติดตั้งช่องทางการไหลนำร่อง ในขณะที่เดียวกันความดันสูญเสียของการไหลของอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็มีค่าสูงขึ้นดัง

แสดงในตารางที่ 3 จากข้อมูลที่แสดงในตารางพบว่า ช่องทางการไหลนำร่องที่ถูกติดตั้งที่ระยะห่างจากแนวกึ่งกลางเท่ากับ $D/12$ และมีมุมเอียงเท่ากับ 15° เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากมีความดันสูญเสียที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 88.31 Pa และอุณหภูมิด้านทางออกจากหม้อไอน้ำ, T_{Oh} มีค่าประมาณ 547.8 K ซึ่งมีความมากกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งเดียวกันก่อนติดตั้งช่องทางการไหลนำร่อง

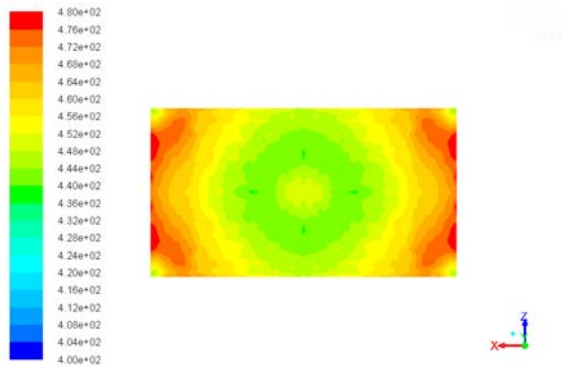
ตารางที่ 3 อุณหภูมิที่ทางออกและความดันสูญเสีย

L	θ	T_{Oh} (K)	T_O (K)	ΔP (Pa)
D/12	15°	547.8	454.4	88.3
	30°	547.2	454.3	126.2
	45°	547.3	454.3	127.4
2D/12	15°	547.4	454.2	120.1
	30°	547.2	454.3	126.2
	45°	546.9	454.3	128.1
3D/12	15°	542.7	449.8	249.8
	30°	547.0	454.3	126.2
	45°	546.4	454.0	128.0

รูปที่ 11 แสดงลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลังการติดตั้งช่องทางการไหลนำร่องที่มีระยะ $L = D/12$ และมีค่า $\theta = 15^\circ$ พบว่าช่องทางการไหลนำร่องสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของอากาศ ส่งผลทำให้อุณหภูมิด้านทางออกจากหม้อไอน้ำมีค่าสูงขึ้นและการกระจายอุณหภูมิที่ทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีรูปแบบที่แตกต่างจากก่อนติดตั้งช่องทางการไหลนำร่องดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 11 แสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลังติดตั้งช่องทางการไหลนำร่อง



รูปที่ 12 แสดงการกระจายอุณหภูมิของอากาศที่ทางออก
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลังติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการไหลและการพาความร้อนของอากาศจากหม้อต้มร้อนสู่หม้อต้มเย็นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีปโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหล โดยพบว่าการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการไหลอากาศผ่านหม้อต้มในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถจำลองและแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยการไหลของอากาศผ่านวัสดุพอรุนได้ โดยจะมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเท่ากับ 4.8 % และเมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องเพื่อจัดระเบียบการไหลของอากาศที่ระยะห่างจากแนวกึ่งกลางเท่ากับ $D/12$, $2D/12$ และ $3D/12$ และแต่ละระยะห่างจะมีการเอียงช่องทางไหลนาร่องเป็นมุม 15° , 30° และ 45° พบว่าที่ตำแหน่ง $L = D/12$ และมุมเอียง $\theta = 15^\circ$ เป็นตำแหน่งเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากทำให้อุณหภูมิที่ทางออกของหม้อต้มร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามความดันสูญเสียเนื่องจากการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องก็มีค่าสูงขึ้นตามมาด้วย ดังนั้นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะ เป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบช่องทางไหลนาร่องที่ทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนการนำเสนอผลงานนี้ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์เชิงคำนวณ (Computational Mechanic Lab, CML)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.G. Beiler, D.G. Krogr, Thermal performance reduction in air-cooled heat exchangers due to non-uniform flow and temperature distributions, Heat Transfer Eng, vol 17(82-92), 1996
- [2] C. Ranganayakulu, K.N. Seetharamu, The combined effects of wall longitudinal heat conduction, inlet fluid flow nonuniformity and temperature nonuniformity in compact tube-fin heat exchangers: a finite element method, Int. J. Heat Mass Transfer 42(263-273), 1999
- [3] C. Ranganayakulu, K.N. Seetharamu, The combined effects of wall longitudinal heat conduction, and inlet fluid flow maldistribution in crossflow plate-fin heat exchangers, Heat Mass transfer 36(247-256), 2000
- [4] S. Lalot, P. Florent, S.K. Lang, A.E. Bergles, Flow maldistribution in heat exchangers, Appl. therm. Eng. 19(847-863), 1999
- [5] L.S. Ismail, C. Ranganayakulu, R.K. Shah, Numerical study of flow patterns of compact plate-fin heat exchangers and generation of design data for offset and wavy fins, Int. J. Heat Mass transfer 52(3972-3983), 2009
- [6] J. Wen, Y. Li, Study of flow distribution and its improvement on the header of plate-fin heat exchanger, Cryogenics 44(823-831), 2004