

# การถ่ายเทความร้อน โดยการพาของกลุ่มครีบบัณฑ์ทรงกรวย On the Convective Heat Transfer of the Cylindrical Taper Pin Fins Array

## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาทั้งการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของครีบบัณฑ์ภายใต้สภาวะพลังความร้อนคงที่ โดยครีบบัณฑ์มีลักษณะทรงกรวยตัดยอด ที่จัดวางในลักษณะแบบเรียงแถว (**In-line layout**) โดยทำการทดลองที่ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอากาศอยู่ในช่วง 1000-9000 ผลที่ได้พบว่า การเพิ่มค่าพลังความร้อนและค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอากาศมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข พบว่ามีความสอดคล้องกันดี

## Abstract

In the present study, the experimental and numerical investigations on the heat transfer characteristics of the pin fin arrays under constant heat flux conditions were presented. The test section was the in-line cylindrical taper pin fin arrays. Experiments was performed at various air Reynolds numbers in the ranging of 1000-9000. It was found that the heat transfer coefficient increase as the heat flux and air Reynolds number are increased. The measured data were compared with the predicted results. The predicted results were reasonable agreement with the experiments.

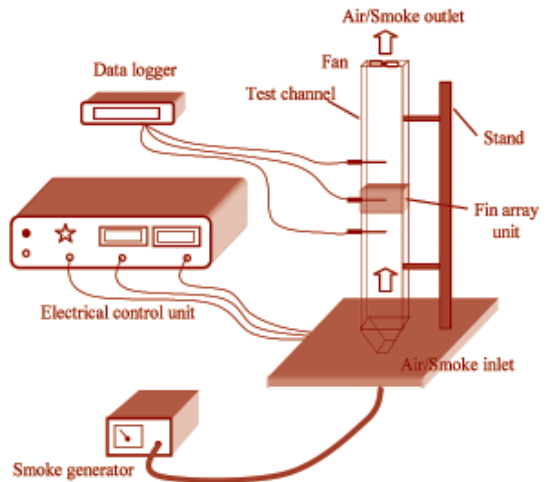
## 1. บทนำ

การพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นขบวนการหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน วิศวกรได้มีการคิดค้นหาวิธีการต่างๆ มาใช้พัฒนาขบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ก็จะประสบกับปัญหาอันมีสาเหตุมาจากขีดจำกัดในการเพิ่มสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน และพื้นที่จำกัดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงได้ค้นหาวิธีที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็คือ การติดโลหะแผ่นบางๆ เข้ากับผิวโลหะเดิมเพื่อเพิ่มพื้นที่ซึ่งเรียกว่าครีป การออกแบบรูปทรงของครีปมีความสำคัญ เนื่องจากการออกแบบที่ดีทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพ แบบครีปแท่งทรงกรวยกลมตัดยอด เป็นครีปที่มีการระบายความร้อนได้ดี และมีการไหลวนของอากาศได้ดี ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง การศึกษาเกี่ยวกับครีปทรงกระบอกนั้น ได้มีนักวิจัยหลายท่าน<sup>(1-7)</sup> ได้ทำการศึกษาไว้ ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนผ่านกลุ่มครีปแบบทรงกรวยยอดตัดที่เรียงตัวแบบเรียงแถว นอกจากนั้นยังได้ศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของครีปดังกล่าว

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากรูปที่ 1 ชุดทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนระบบควบคุม ประกอบด้วยชุดปรับความพัลส์ความร้อน ความเร็วลม และชุดวัดอุณหภูมิซึ่งเป็นระบบดิจิทัลโดยบรรจุรวมไว้ในตู้ระบบควบคุม ส่วนที่สองซึ่งแยกออกมาจะเป็นส่วนของอุโมงค์ลมประกอบไปด้วย อุโมงค์ลมครีปที่บรรจุในชุดให้ความร้อน (Heater) และพัดลมดูดอากาศ โดยคุณสมบัติต่างๆ ของครีปแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของอุโมงค์ลมมี

ลักษณะเป็นกล่องขนาด 0.07x0.12x1.02 m ด้านหน้าส่วนที่ติดตั้งครีปทำจากอลูมิเนียมเพื่อสังเกตและบันทึกภาพพฤติกรรมกรการไหลของอากาศ ส่วนที่สามเป็นชุดกำเนิดควัน (Smoke generator)



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง

ชุดครีปทดลองเป็นแบบสมมาตร (Symmetry) ดังนั้น ในการทดลองจึงได้วัดอุณหภูมิต่างๆ เพียงด้านเดียว โดยวัดอุณหภูมิของผิวครีป และอุณหภูมิของอากาศแต่ละจุดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย การวัดอุณหภูมิของผิวครีปแบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือในระดับบริเวณฐานของชุดครีป ( $T_0$ ) ส่วนล่าง ( $T_1$ ) ส่วนกลาง ( $T_2$ ) และส่วนปลายครีป ( $T_3$ ) ซึ่งอยู่ในระดับความสูงของครีป 0 6 35 และ 62 mm จากฐานครีปตามลำดับ โดยวัดบริเวณผิวของฐานครีปตามจุดต่างๆ 5 จุดด้วยกัน

ในส่วนของอุณหภูมิของอากาศในขณะที่ไหลผ่านครีปแบ่งการวัดเป็น 3 ระดับ คือในแนวระดับของส่วนล่าง ส่วนกลาง และส่วนปลายครีป ซึ่งทำการวัดทั้งหมด 15 จุดด้วยกัน อากาศในอุโมงค์ลมทำการวัดอุณหภูมิทั้งขาเข้าและขาออก การวัดแบ่งเป็น 3 จุดตามระดับการไหลเช่นกัน

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติและขนาดต่างๆ ของครีป

ลักษณะครีป	วัสดุครีป	ขนาดครีป $\phi D - \phi d - L$ (mm)	ขนาดฐานครีป กว้าง-ยาว-หนา (mm)	จำนวน ครีป (อัน)	พื้นที่รับ ความร้อน ( $m^2$ )	พื้นที่ผิวถ่ายเท ความร้อน ( $m^2$ )
เรียงแถว	อะลูมิเนียม	13-7.24-67	110-100-15	16	0.011	0.0437

คือที่แนวระนาบ  $T_1$   $T_2$   $T_3$  ซึ่งอยู่ในระดับความสูงของครีป 6 35 62 mm จากฐานครีป ตามลำดับ

● นิสเซลล์ท์นัมเบอร์

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (5)$$

### 3. การคำนวณการทดลอง

เมื่อได้ข้อมูลจากการทดลองแล้วก็นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

● ตัวเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์

$$Re = \frac{u_\infty D_h}{\nu} \quad (1)$$

โดยที่

$u_\infty$  = ความเร็วฟรีสตรีม

$D_h$  = Hydraulic diameter

$\nu$  = ความหนืดจลนศาสตร์

● อัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q = \dot{m} C_p (\bar{T}_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

$$Q_{conv} = \frac{Q_{elec} + Q_{out}}{2} \quad (3)$$

● สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$h = \frac{Q}{A_s (\bar{T}_s - T_{in})} \quad (4)$$

โดยที่

$Q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อน

$C_p$  = ความร้อนจำเพาะ

$T_{out}$  = อุณหภูมิเฉลี่ยอากาศขาออก

$T_s$  = อุณหภูมิผิวครีปเฉลี่ย

$T_{in}$  = อุณหภูมิขาเข้า

$A_s$  = พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน

$k$  = ค่าการนำความร้อน

### 4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน โดยการพาของอากาศสามารถอธิบายโดยใช้สมการสมดุลมวล สมการโมเมนตัม สมการพลังงาน และแบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองมาตรฐาน K- $\epsilon$  นำมาใช้ในการวิเคราะห์สำหรับปัญหา โดยมีสมการเกี่ยวข้องดังนี้

สมการต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (6)$$

สมการโมเมนตัม:

แกน x:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{M_x} \quad (7)$$

แกน y:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{M_y} \quad (8)$$

แกน z:

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{M_z} \quad (9)$$

สมการพลังงาน:

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \text{div } \mathbf{U} + \text{div}(k \text{grad } T) + \Phi + S_i \quad (10)$$

สมการ Turbulent kinetic energy (k):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \quad (11)$$

สมการ Turbulent kinetic energy dissipation (ε):

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (12)$$

สมการขอบเขต:

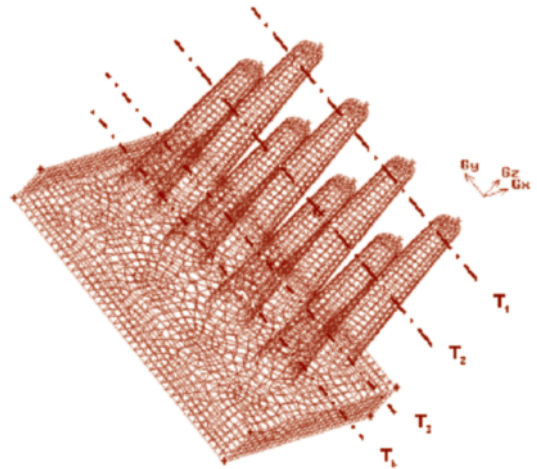
$$u = 0, v = 0, w = 0, q = q_{\text{wall}} \quad (13)$$

สมการเงื่อนไขเริ่มต้น:

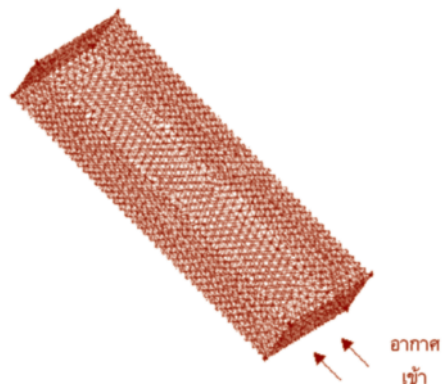
$$u = u_{in}, v = 0, w = 0, T = T_{in}, k = k_{in}, \epsilon = \epsilon_{in} \quad (14)$$

## 5. การคำนวณเชิงตัวเลข

ในส่วนของการคำนวณระเบียบเชิงตัวเลขนั้นได้ใช้วิธีระเบียบปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และใช้การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Second order scheme เพื่อ discretize สมการที่เกี่ยวข้องและใช้ขบวนการหาค่าตอบโดยวิธี SIMPLEC รูปแบบการจัดวางกริดดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นกริดแบบสี่เหลี่ยมสำหรับชุดครีบทดลองและกริดแบบสามเหลี่ยมสำหรับอากาศในชุดอุโมงค์ลม มีจำนวน  $3.5 \times 10^5$  กริด โดยใช้โปรแกรม Fluent 6 ในการวิเคราะห์



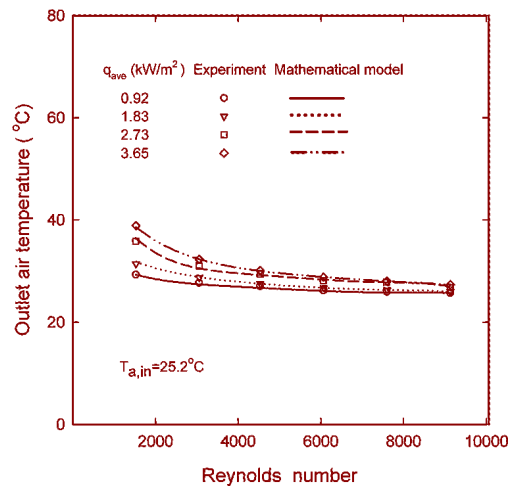
รูปที่ 2 แสดงลักษณะของกริดในส่วนของครีบ



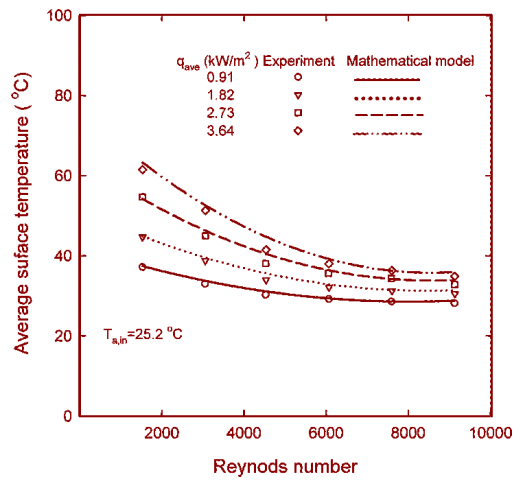
รูปที่ 3 แสดงลักษณะของกริดในส่วนของอากาศ

## 6. ผลการวิเคราะห์

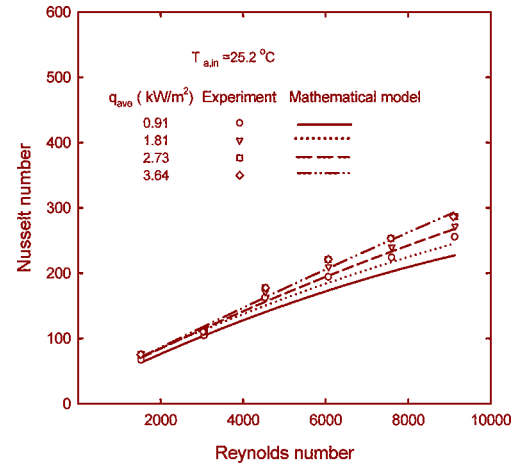
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข และส่วนที่สองคือการศึกษาเชิงพารามิเตอร์จากการคำนวณเชิงตัวเลข รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิขาออกของอากาศเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองกับผลการคำนวณของชุดทดสอบของครีที่เรียงแบบเรียงแถว ที่พลักซ์ความร้อน (Heat flux) ต่างๆ ที่อุณหภูมิอากาศทางเข้า  $25.2^{\circ}\text{C}$  โดยอุณหภูมิของอากาศที่วัดจากการทดลองทั้งหมด 3 จุด จากกราฟพบว่าเมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นอุณหภูมิขาออกของอากาศมีแนวโน้มลดลง เพราะอัตราการเพิ่มขึ้นของของการไหลของอากาศมีมากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer rate) ดังนั้นอุณหภูมิขาออกของอากาศจึงมีแนวโน้มลดลง แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลของอากาศสูงๆ อัตราการลดลงของอุณหภูมิจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อให้อัตราการไหลของอากาศคงที่ อุณหภูมิขาออกของอากาศมีค่าสูงขึ้นเมื่อพลักซ์ความร้อนที่ให้มีความสูงขึ้น เนื่องจากว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทให้กับอากาศแปรตามความร้อนที่ให้ อย่างไรก็ตามผลของพลักซ์ความร้อนที่ให้มีความเด่นชัดเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำๆ และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ามีความสอดคล้องกันดี ซึ่งให้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.06%



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบ  $T_{a,out}$



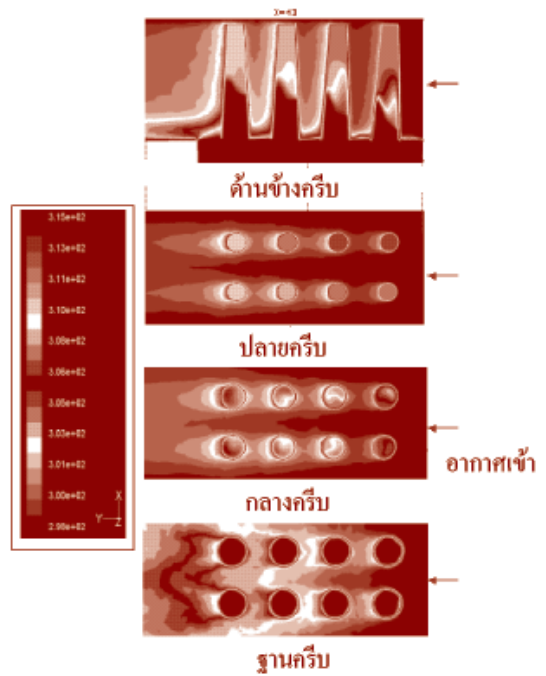
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบ  $T_{s,ave}$



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบ Nu

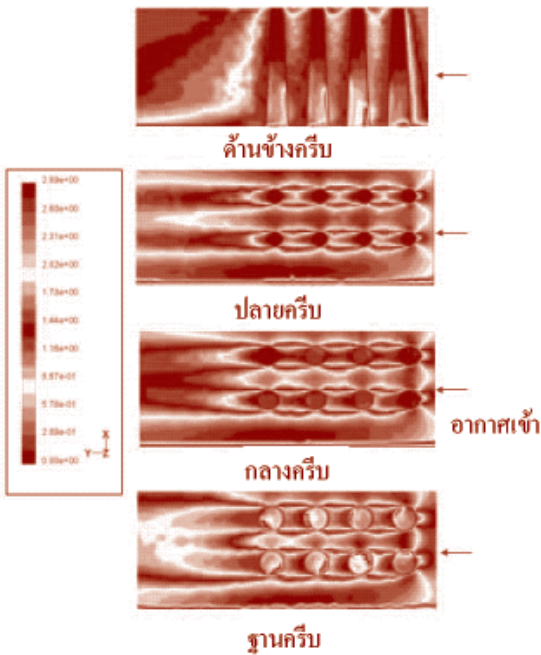
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีบกับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ที่ค่าพลังความร้อนต่างๆ กัน โดยอุณหภูมิผิวครีบได้จากการวัดอุณหภูมิของส่วนที่เป็นฐาน 5 จุด และอุณหภูมิในส่วนที่เป็นครีบ 12 จุดในแต่ละความเร็วของอากาศ ซึ่งอุณหภูมิของครีบที่วัดนั้นวัดทั้งบริเวณด้านหน้าครีบและหลังครีบ จากกราฟพบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงขึ้น อุณหภูมิของผิวครีบลดลง ทั้งนี้ก็เพราะว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวครีบให้กับอากาศขึ้นอยู่กับอัตราการระบายความร้อน (Cooling capacity) ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวครีบจึงมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในกราฟ เมื่อให้อัตราการไหลของอากาศคงที่ อุณหภูมิของผิวครีบแปรตามพลังความร้อน (Heat flux) ที่ให้ และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2.20%

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nusselt นัมเบอร์กับค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอากาศที่ค่าพลังความร้อนต่างๆ กัน จากกราฟพบว่าค่า Nusselt นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าค่า Nusselt นัมเบอร์แปรตามความสามารถในการระบายความร้อนของอากาศ และเมื่อให้อัตราการไหลของอากาศคงที่ พบว่าค่า Nusselt นัมเบอร์เพิ่มขึ้นตามพลังความร้อนที่ให้ เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีความสอดคล้องกันดี โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 8.44%



รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่หน้าตัดต่างๆ กัน ที่ความเร็วของอากาศ 1.67 m/s พลังความร้อน 3.64 kW/m<sup>2</sup>

รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและครีบที่ฐานครีบ กลางครีบ และปลายของครีบ และการไหลของอากาศโดยมีความเร็วลม 1.67 m/s ที่พลังความร้อน 3.64 kW/m<sup>2</sup> ที่ความเร็วของอากาศคงที่ การกระจายตัวของความร้อนส่วนปลายของครีบบมีค่าสูง และต่ำสุดบริเวณฐานของครีบ และในส่วนครีบที่อยู่บริเวณแถวหน้ามีการระบายความร้อนดีกว่าในบริเวณแถวด้านหลังของชุด รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอากาศในขณะไหลผ่านกลุ่มครีบที่หน้าตัดต่างๆ กัน ที่ความเร็ว 0.83 m/s พลังความร้อน 2.73 kW/m<sup>2</sup> ของการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ



รูปที่ 8 แสดง Contour ความเร็วของการไหลของอากาศบริเวณที่ด้านข้างครีบบน, ฐานครีบบน, กลางครีบบน และปลายของครีบบน

## 7. สรุปผลการทดลอง

การศึกษากาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของชุดครีบบน โดยให้พลักซ์ความร้อนคงที่ จากการทดลองและการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลที่ได้จากทั้งสองวิธี มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีและพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้ม ความร้อนและอัตราการไหลของอากาศ มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของครีบบนสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นจากค่าทั้งสอง ทำให้การกระจายตัวของความร้อนและของอากาศดีขึ้น จึงส่งผลโดยรวมให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงขึ้น

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ทุนในการวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

## เอกสารอ้างอิง

- (1) R.F.B. Haq, K. Akintunde, and S.D. Probert, Thermal performance of a pin fin assembly, International Journal of Heat and Fluid Flow, 16 (1995) 50-55.
- (2) S. Das, P. Razelos, Optimization of convective trapezoidal profile circular pin fins, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 24 (1997) 553-541.
- (3) L. Elliott, P.J. Heggs, D.B. Ingham, D. Lesnic, X. Wen, Analysis of polygonal fins using the boundary element method, Applied Thermal Engineering, 24 (2004) 1321-1339.
- (4) S.V. Naidu, V. Dharma, P.K. Sarma, T. Subrahmanyam, Performance of a circular fin in a cylindrical porous enclosure, Int. Comm. Heat and Mass Transfer, 31 (2004) 1209-1218.
- (5) Y. Pced, A. Kosar, C. Mishra, B. Schneider, C.J. Kuo, Forced convective heat transfer across a pin fin micro heat sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2005).
- (6) M. Corcione, Correlating equations for free convection heat transfer from horizontal isothermal cylinders set in a vertical array, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2005).
- (7) N. Sahiti, A. Lemouedda, D. Stojkovic, F. Durst, E. Durst, E. Franz, Performance comparison of pin fin in-duct flow arrays with various pin cross-sections, Applied thermal Engineering, (2005).