



การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

ปริญญา อัครเดชเรืองศรี ภาวิธ จันทสร อุกฤษฏ์ ธรรมะ และ อรรถสิทธิ์ วงศ์เจริญ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: athasit.w@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 ตุลาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 29 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 16 มกราคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน กำหนดให้แผงระบายความร้อนแบบครีบบางมีลักษณะครีบบางเป็นครีบบางวงกลมและเป็นวัสดุประเภทอะลูมิเนียมอัลลอย ให้ฟลักซ์ความร้อนอยู่ใต้พื้นผิวของแผงระบายความร้อนมีค่าเท่ากับ 45 W ในส่วนของของไหล กำหนดให้เป็นอากาศที่มีอุณหภูมิและความเร็วลมทางเข้าเท่ากับ 300 K และ 5.2 m/s ตามลำดับ โดยการไหลของอากาศเป็นแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ ในงานวิจัยนี้ออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบางวงกลมของแผงระบายความร้อนมีดังนี้ รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างหกเหลี่ยม โดยกำหนดอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผงระบายความร้อนและอากาศ (ISA) ต่อปริมาตรทั้งหมดของแผงระบายความร้อน (TVH) เท่ากับ 0.54 mm^{-1} จากผลพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu) มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม และความดันลด (ΔP) มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างวงกลม รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม เนื่องจากสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (TEF) คำนวณมาจากอัตราส่วนของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่อการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน จึงพบว่ารูปร่างการเจาะรูต่าง ๆ มีค่า TEF ที่ต่างกัน ซึ่งมีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม โดยการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า TEF มีค่าสูงสุด และมีค่ามากกว่าแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมที่ไปถึง 43.1 %

คำสำคัญ: แผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลม; เลขนัสเซิลต์; ความดันลด; สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน



Effects of Pin-perforation Shape on Thermal Enhancement Factor of Pin-fin Heat Sink via Numerical Simulation

Parinya Ackaradetrungsri, Pawat Jantasorn, Ukrit Thamma and Athasit Wongcharoen*

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: athasit.w@cit.kmutnb.ac.th

Received: 12 October 2022; Revised: 29 November 2022; Accepted: 16 January 2023

Online Published: 19 March 2023

Abstract: Effects of pin-perforation shape on the thermal enhancement factor of pin-fin heat sink via numerical simulation are presented here in this study. The material for the pin-fin heat sink is assigned to be an aluminum alloy, and the shape of the pin fins on the heat sink is circular. The heat source generating 45 W of heat flux is placed on the bottom of the heat sink. The inlet air temperature and velocity are 300 K and 5.2 m/s, respectively. The numerical air-flow model of steady turbulent main flow follows the standard $k - \epsilon$. Four pin-perforation shapes on pin fins are diamond, triangular, hexagonal, and circular of which all share the same ratio of the air/heat-sink interfacial surface area (ISA) to the total volume of the heat sink (TVH) of approximately 0.54 mm^{-1} . The lowest to highest Nusselt number (Nu), which represents the convective heat transfer efficiency, is found in diamond-perforation, triangular-perforation, hexagonal-perforation, and circular-perforation pin-fin heat sink, respectively. The lowest to highest pressure drop (ΔP), which signifies the hydraulic friction loss due to airflow restriction caused by pin-fin heat sinks, is found in circular-perforation, hexagonal-perforation, diamond-perforation, and triangular-perforation pin-fin heat sink, respectively. Lastly, the thermal enhancement factor (TEF), a ratio of the convective heat transfer efficiency to friction loss, from the lowest to highest are diamond-perforation, triangular-perforation, hexagonal-perforation, and circular-perforation pin-fin heat sinks, respectively. The circular-perforation pin-fin heat sink is shown to yield the highest TEF which is 43.1% higher than that of the pin-fin heat sink without pin-perforation.

Keywords: Circular pin-fin heat sink; Nusselt number; Pressure drop; Thermal enhancement factor



1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากทำให้ภาคอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นที่ต้องการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาผลิตชิ้นส่วน และอะไหล่ในกลุ่มอุตสาหกรรม เช่น ยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า โทรศัพท์ คอมพิวเตอร์ ฯลฯ ทำให้มีการแข่งขันสูงจึงส่งผลให้ผู้ประกอบการ และผู้ผลิตต้องสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานได้รวดเร็ว มีน้ำหนักเบา ราคาถูกและมีขนาดเล็กจึงส่งผลให้เกิดอัตราความร้อนที่สูงขึ้น ความร้อนดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีอายุการใช้งานที่สั้นลงและมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งแผงระบายความร้อน (Heat Sink) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการระบายความร้อนให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวในอากาศซึ่งทำให้พาความร้อนจากตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่ในอากาศโดยรอบส่งผลให้เกิดการระบายความร้อนได้รวดเร็ว ในปัจจุบันแผงระบายความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบบังคับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ แผงระบายความร้อนแบบครีบบัณเฑาะ (Plate-fin) และแบบครีบบัณเฑาะ (Pin-fin) ซึ่งแผงระบายความร้อนแบบครีบบัณเฑาะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนหรือเลขนัสเซลต์ (Nusselt Number) สูงกว่าแผงระบายความร้อนแบบครีบบัณเฑาะ อย่างไรก็ตามแผงระบายความร้อนแบบครีบบัณเฑาะมีค่าความดันลด (Pressure drop) และค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน (Friction Factor) สูงกว่าแผงระบายความร้อนแบบครีบบัณเฑาะ [1-5]

รูปทรงของครีบบัณเฑาะกระจายความร้อนมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อนที่มีครีบบัณเฑาะรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ เช่น แบบครีบบัณเฑาะสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบครีบบัณเฑาะสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบบครีบบัณเฑาะหกเหลี่ยม แบบครีบบัณเฑาะวงกลม และแบบครีบบัณเฑาะวงรี โดยพบว่าระบายความร้อนแบบครีบบัณเฑาะวงกลมมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด [5, 6]

นอกจากนี้การจัดเรียงตำแหน่งของครีบบัณเฑาะบนแผงระบายความร้อนยังมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และต่อความดันลดและค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานในการจัดเรียงครีบบัณเฑาะแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้ (1) แบบแถวตรง (In-line) และ (2) แบบแถวสลับ (Staggered) ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้เปรียบเทียบแผงระบายความร้อนแบบครีบบัณเฑาะจัดเรียงแบบแถวตรงกับครีบบัณเฑาะจัดเรียงแบบแถวสลับ พบว่าการจัดเรียงครีบบัณเฑาะแบบแถวสลับมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการจัดเรียงครีบบัณเฑาะแบบแถวตรงแต่การจัดเรียงครีบบัณเฑาะแบบแถวสลับมีค่าความดันลดและค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานสูงกว่าการจัดเรียงครีบบัณเฑาะแบบแถวตรง [5-9]

การเจาะรูบนครีบบัณเฑาะของแผงระบายความร้อนมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และต่อความดันลดและค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน เนื่องจากการเจาะรูบนครีบบัณเฑาะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศและยังทำให้อากาศเคลื่อนตัวผ่านได้ง่ายขึ้น ซึ่งมี



งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้เปรียบเทียบแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางที่กับแบบเจาะรูบนครีบบางพบว่าแผนกระจายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบางมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบครีบบางที่บวม และการเจาะรูบนครีบบางทำให้ความดันลดลงและมีค่าการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานลดลง [10-23] จากการศึกษาของ Huang et. al., [24] ได้ออกแบบแผนกระจายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบางวงกลมจัดเรียงครีบบางแบบแถวสลับโดยใช้วิธีเลเวนเบิร์ก-มาร์ควาร์ดท์ (Levenberg-Marquardt) เพื่อประเมินค่าเหมาะสมที่สุดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะวงกลม ขนาดครีบบางวงกลม และความสูงของครีบบางวงกลม โดยกำหนดให้ปริมาตรของแผนกระจายความร้อนมีค่าเท่ากัน จากผลการจำลองเชิงตัวเลขซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง พบว่าการเจาะรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลมของแผนกระจายความร้อนมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 25.9% ถึง 28.0% และอุณหภูมิเฉลี่ยบนแผ่นฐานลดลง 20.2% ถึง 21.5% เมื่อเทียบกับแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลมที่บวม แต่ยังไม่มีการคำนึงถึงพื้นที่ผิวของแผนกระจายความร้อนที่อาจจะผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานของ แผนกระจายความร้อนที่ไม่เท่ากัน

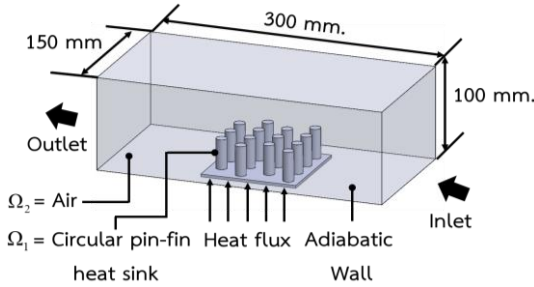
เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาในเชิงลึกของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมของแผนกระจายความร้อนที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและผลกระทบต่อ การสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานของแผนกระจายความร้อนอย่างไร ในศึกษาการจำลอง

เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผนกระจายความร้อน โดยได้ออกแบบรูปร่างรูเจาะต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมของแผนกระจายความร้อนให้มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผนกระจายความร้อนและอากาศต่อปริมาตรทั้งหมดของแผนกระจายความร้อนนั้นเท่ากัน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 โดเมน สมการ และพารามิเตอร์ในการจำลองเชิงตัวเลข

ผู้วิจัยได้ศึกษาการตั้งค่าการจำลองเชิงตัวเลขของแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลมจากการศึกษาของ Huang et. al., [24] ที่มีผลการจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายความร้อนใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง โดยการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้กำหนดให้ Ω เป็นโดเมนที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขมี ความกว้าง x ความยาว y ความสูงเท่ากับ $150 \times 300 \times 100$ mm และ $\{\Omega\} = \{\Omega_1 \cup \Omega_2\}$ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ Ω_1 เป็นส่วนของแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลม วัสดุเป็นอะลูมิเนียมอัลลอย A5083P มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 168 W/m.K และ Ω_2 เป็นส่วนของของไหลนั้นซึ่งเป็นอากาศที่มีคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์เป็นค่าคงที่และมีการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ มีอุณหภูมิและความเร็วลมทางเข้าเท่ากับ 300 K และ 5.2 m/s ตามลำดับ จากความเร็วลมทางเข้าสามารถคำนวณเป็นเลขเรย์โนลด์ส์ได้ $39,259$ ดังนั้นจึงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน แต่ในส่วนฟลักซ์ความร้อน (q) จะอยู่ที่พื้นผิวของแผนกระจายความร้อนแบบครีบบางวงกลม (A_p) ซึ่งมีค่าฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 45 W



รูปที่ 1 โดเมนการจำลองเชิงตัวเลข

การคำนวณในการจำลองเชิงตัวเลขของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม Ω_1 มีสมการพลังงานในแนวแกน XYZ ตามสมการดังนี้

$$\frac{\partial^2 T_f(\Omega_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f(\Omega_1)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_f(\Omega_1)}{\partial z^2} = 0; \text{ in } \Omega_1 \quad (1)$$

$$k_f \frac{\partial T_f}{\partial z} = q; \text{ ใต้พื้นผิวของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม } A_b \quad (2)$$

เมื่อ T_f คือ การกระจายอุณหภูมิของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม (K)

k_f คือ การนำความร้อนของแผ่กระจายความร้อนแบบครีปแท่งวงกลม (W/m.K)

การคำนวณในการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศ Ω_2 มีสมการมวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ในแนวแกน XYZ โดยแสดงในสมการ (3), (4) และ(5) ตามลำดับดังนี้ [25]

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4)$$

$$\rho u_j \frac{\partial T_a}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_l}{\sigma_l} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T_a}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่น (kg/m³)

x_i, x_j คือ พิกัด (m)

u_i, u_j คือ ส่วนประกอบความเร็วลม (m/s)

P คือ ความดัน (N/m²)

T คือ อุณหภูมิ (K)

σ คือ เลขพรันด์เทิล

แบบจำลองการไหลของอากาศ Ω_2 ได้ประยุกต์การไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน $k - \varepsilon$ (Turbulence Standard $k - \varepsilon$) ในสภาวะคงที่ที่ใช้เป็นหลักของสมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy, k) และสมการอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation of Turbulence Kinetic Energy, ε) โดยแสดงในสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ ดังนี้ [25]

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k_a} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k_a} \quad (7)$$

เมื่อ k คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (m²/s²)

ε คือ การกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (m²/s²)

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ (kg/m.s)

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ คือ ค่าคงที่ของความปั่นป่วน

k_a คือ การนำความร้อนของอากาศ (W/m.K)

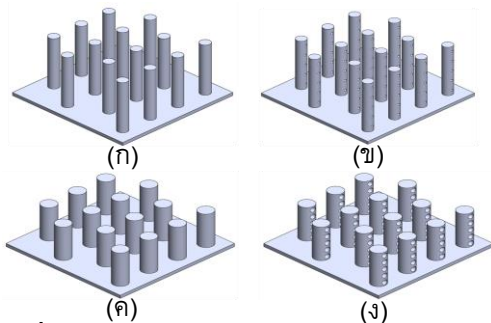
C_1, C_2 คือ ค่าคงที่ของความปั่นป่วน



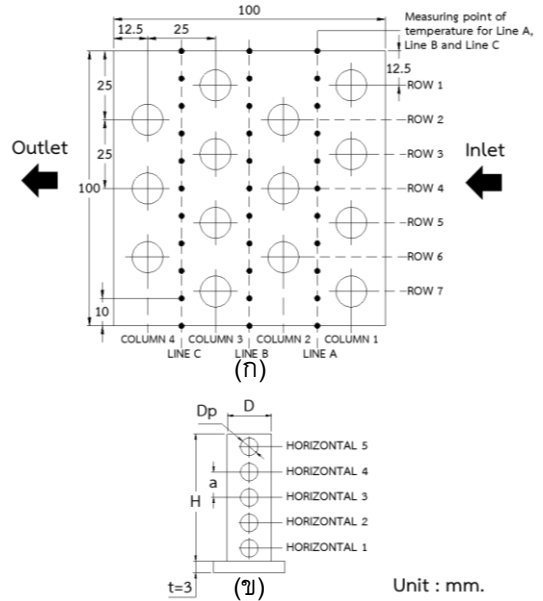
โดเมนในการจำลองเชิงตัวเลขนั้นมีเงื่อนไขขอบเขตผนังโดเมนแบบไม่ลื่น (Nonslip Boundary Conditions) ซึ่งถูกนำไปใช้กับผนังทั้งหมดในโดเมนเพื่อให้ความเร็วในการไหลมีค่าเท่ากับ 0 ในทุกพื้นที่ ซึ่งการจำลองเชิงตัวเลขผู้วิจัยได้นำโปรแกรม ANSYS Fluent 19.3 มาใช้แก้สมการพีชคณิตตั้งที่กล่าวมาเบื้องต้นด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำในงานวิจัยนี้

2.2 ผลกระทบของพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

แผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขของ Huang et. al. [24] ประกอบไปด้วยแผงระบายความร้อน Solid #1 และ Solid #2 เป็นครีบบางวงกลมแบบทึบ และในส่วนแผงระบายความร้อน Design #3-1 และ Design No.1 เป็นแบบเจาะรูบนครีบบางวงกลมดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในส่วนขนาดของแผงระบายความร้อน ขนาดของครีบบางวงกลม ตำแหน่งของครีบบางวงกลม และขนาดรูเจาะบนครีบบางวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 1



รูปที่ 2 แผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลม (ก) Solid #1, (ข) Design #3-1, (ค) Solid #2 และ (ง) Design No.1



รูปที่ 3 ข้อมูลของแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลม (ก) ขนาดของแผงระบายความร้อนและตำแหน่งของครีบบางวงกลม และ (ข) ขนาดครีบบางวงกลมและขนาดรูเจาะบนครีบบางวงกลม

ตารางที่ 1 ข้อมูลครีบบางวงกลมของแผงระบายความร้อนของ Huang et. al., [24]

Pin-fin heat Sinks	D (mm.)	H (mm.)	D _p (mm.)	a (mm.)
Solid #1	8.00	50.00	-	-
Solid #2	11.30	32.10	-	-
Design #3-1	8.00	50.00	2.00	10.00
Design No.1	11.30	32.10	4.42	6.42

สมการที่ใช้ในการตรวจสอบ และสรุปผลการทดลองของผลการจำลองเชิงตัวเลขที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงของ Huang et. al., [24] มีสมการดังต่อไปนี้



$$Nu = \frac{qDh}{k_{air} \left(T_w - \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \right)} \quad (8)$$

เมื่อ Nu คือ เลขนัสเซิลต์

q คือ ฟลักซ์ทางความร้อน (W/m^2)

Dh คือ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อสี่เหลี่ยม (m)

k_{air} คือ การนำความร้อนของอากาศ ($W/m.K$)

T_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนแผ่นฐาน (K)

T_{out} คือ อุณหภูมิทางออก (K)

T_{in} คือ อุณหภูมิทางเข้า (K)

$$Re_h = \frac{\rho U_0 Dh}{\mu} \quad (9)$$

เมื่อ Re_h คือ เลขเรย์โนลด์ส์

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

U_0 คือ ความเร็วลมของอากาศทางเข้า (m/s)

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ ($kg/m.s$)

$$Dh = \frac{4A}{Pc} \quad (10)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องสี่เหลี่ยม (m)

Pc คือ เส้นรอบรูปของช่องสี่เหลี่ยม (m)

$$ISA/TVH = \frac{\text{Interfacial surface area between air and heat sink}}{\text{Total volume of heat sink}} \quad (11)$$

ตารางที่ 2 ผลการจำลองเชิงตัวเลข Design No.1, Design #3-1, Solid #1 และ Solid #2 ของ Huang et. al., [24]

Pin-fin Heat Sinks	Nu	T_w (°C)	Surface Area (mm ²)	Volume (mm ³)	ISA/TVH (mm ⁻¹)
Design No.1	1,183.59	46.49	34,313.84	63,232	0.54
Design #3-1	940.00	51.46	30,612.82	63,382	0.48
Solid #1	888.56	52.88	27,593.02	64,919	0.42
Solid #2	871.58	53.43	25,953.74	74,882	0.35

ผลการจำลองเชิงตัวเลขซึ่งผลใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงของ Huang et. al. [24] พบว่าค่า Nu มีค่าจากสูงไปยังค่าต่ำตามลำดับดังนี้ Design No.1, Design #3-1, Solid #1 และ Solid #2 แสดงให้เห็นว่า Design No.1 นั้นถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเนื่องจากพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน ผู้วิจัยจึงตั้งสมมุติฐานว่าอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผงระบายความร้อนและอากาศ (Interfacial surface area between air and heat sink, ISA) ต่อปริมาตรทั้งหมดของแผงระบายความร้อน (Total volume of heat sink, TVH) ตามสมการที่ 11 มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

จากผลพบว่าค่า Nu มีค่าจากสูงไปต่ำตามค่า ISA/TVH ตามลำดับดังนี้ Design No.1, Design #3-1, Solid #1 และ Solid #2 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อนแบบครีบบั้วทรงกลมทั้ง 4 แบบนี้แปรผันตรงกับ ISA/TVH



2.3 การออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลมของแผงระบายความร้อน

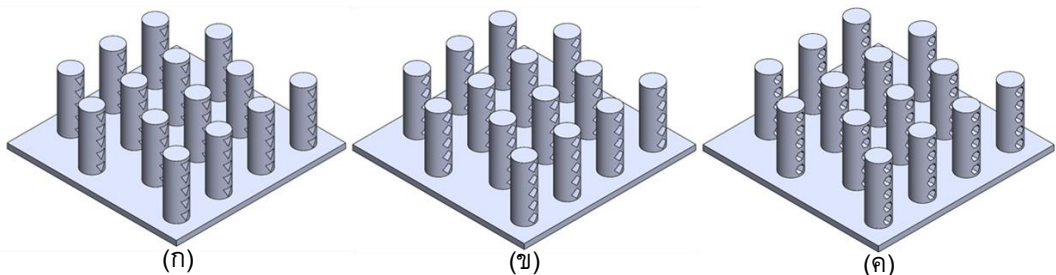
ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาผลกระทบของรูปร่างรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลมของแผงระบายความร้อน ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลมแบบอื่น ๆ เพิ่มเติมคือ รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยอ้างอิงขนาดและตำแหน่งของครีบบนแท่งวงกลมบนแผงระบายความร้อน Design No. 1 ที่มีรูเจาะรูปร่างวงกลมบนครีบบนแท่งวงกลม ในการศึกษาของ Huang et. al., [24] ซึ่งขนาดของรูเจาะที่มีรูปร่างเพิ่มเติมตั้งที่กล่าวมานี้ จะถูกออกแบบ และกำหนดขนาดเพื่อให้มีค่า ISA/TVH เท่ากับแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบนแท่งวงกลมหรือ Design No. 1 ที่มีค่า ISA/TVH เท่ากับ 0.54 mm^{-1} เพื่อควบคุมตัวแปรของพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้มีความคงที่

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้สมการสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) ตามสมการที่ 12 มาวิเคราะห์ผลกระทบของรูปร่างรูเจาะต่าง ๆ บนครีบบนแท่งวงกลมต่อสมรรถนะ

การถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลม เนื่องจาก TEF คำนึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu / Nu_0) ต่อการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทานของแผงระบายความร้อน $(f / f_0)^{1/3}$ [26-28] โดยกำหนดให้แผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลม Solid #2 (Nu_0 และ f_0) เปรียบเทียบกับแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบนแท่งวงกลม (Nu และ f) มีสมการดังนี้

$$TEF = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0} \right)}{\left(\frac{f}{f_0} \right)^{1/3}} \quad (12)$$

- เมื่อ TEF คือ สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
- Nu คือ เลขนัสเซิลต์ของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบนแท่งวงกลม
- Nu_0 คือ เลขนัสเซิลต์ของแผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลมที่ Solid #2
- f คือ แรงเสียดทานของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูบนครีบบนแท่งวงกลม
- f_0 คือ แรงเสียดทานของแผงระบายความร้อนแบบครีบบนแท่งวงกลมที่ Solid #2



รูปที่ 4 แผงระบายความร้อนแบบรูเจาะบนครีบบนแท่งวงกลม (ก) รูปร่างสามเหลี่ยม (ข) รูปร่างเพชร และ (ค) รูปร่างหกเหลี่ยม



$$f = \frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right) Dh}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (13)$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันลด (Pa)

L คือ ระยะความยาวของท่อสี่เหลี่ยม (m)

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (14)$$

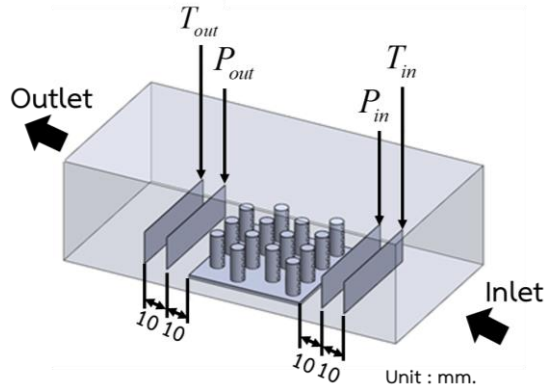
เมื่อ P_{in} คือ ความดันทางเข้า (Pa)

P_{out} คือ ความดันทางออก (Pa)

จากการจำลองเชิงตัวเลขผู้วิจัยได้กำหนดจุดวัดค่า P_{in} , P_{out} , T_{in} และ T_{out} โดยการหาค่าเฉลี่ยบนระนาบที่ตั้งแสดงในรูปที่ 5 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า Nu , f และ TEF

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในการจำลองเชิงตัวเลขผู้วิจัยกำหนดโครงสร้างเป็นแบบกริดไร้โครงสร้าง (Unstructured Grid) โดยควบคุมคุณภาพกริดด้วยความเบ้ (Skewness) มีค่าน้อยกว่า 0.25 ซึ่งกำหนดวิธีการแก้ปัญหาเป็นแบบ Pressure-based coupled solver และรูปแบบการแก้ปัญหาของมวล, โมเมนตัม, พลังงาน, พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนด้วยสมการอันดับ 2 (Second order) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำได้ถูกนำมาแก้ปัญหาระบบสมการพีชคณิตของปัญหาและค่าการลู่เข้าของระบบสมการนั้นกำหนดให้ค่าความแตกต่าง (Residual of Physical Quantities) ต้องมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} ในการทดลองหาจำนวนกริดที่เหมาะสมในการจำลองเชิงตัวเลข ผู้วิจัยได้สร้างกริด 5 จำนวน สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขของแผง



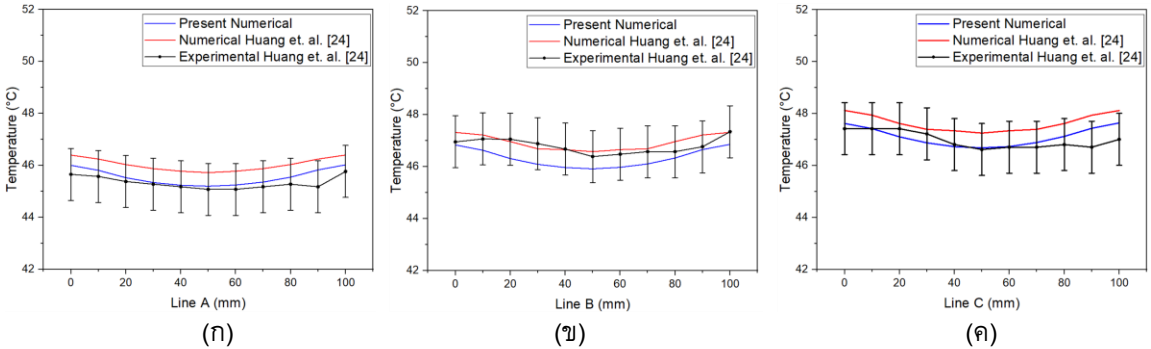
รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งจุดวัดค่าเฉลี่ยบนระนาบ P_{in} , P_{out} , T_{in} และ T_{out}

ระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบท่างวงกลม (Design No.1) ดังนี้ 1.3×10^6 , 1.4×10^6 , 1.5×10^6 , 1.6×10^6 และ 1.7×10^6 จากผลการจำลองเชิงตัวเลขตามจำนวนกริดพบว่าค่า T_w เท่ากับ 46.451°C , 46.396°C , 46.362°C , 46.337°C และ 46.332°C ตามลำดับ ซึ่งค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ของ T_w ระหว่างจำนวนกริดเท่ากับ 1.6×10^6 และ 1.7×10^6 แค่เพียง 0.01% จึงไม่จำเป็นต้องสร้างกริดไปมากกว่านี้ ผู้วิจัยจึงนำจำนวนกริด 1.6×10^6 มาใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขทั้งหมด

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงตัวเลขโดยการวัดอุณหภูมิตาม Line A, Line B และ Line C ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งผู้วิจัยได้นำผลการจำลองเชิงตัวเลขของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบท่างวงกลม (Design No.1) มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลขและการทดลองจริงของ Huang et. al. [24] พบว่ามีค่าผิดพลาดไม่เกิน 1°C ดังแสดงในรูปที่ 6



บทความวิจัย



รูปที่ 6 อุณหภูมิบนแผ่นฐานของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลม (Design No.1)

(ก) Line A (ข) Line B และ (ค) Line C

3.1 ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

จากการวัดอุณหภูมิของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลม ได้แก่ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลมดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 พบว่าค่า T_w เท่ากับ 48.904°C, 47.706°C, 46.528°C และ 46.337°C ตามลำดับ ซึ่งการเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลม ช่วยลดอุณหภูมิในแผงระบายความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมที่บ Solid #2 ที่มีค่า T_w เท่ากับ 53.038°C จากผลค่า Nu ยิ่งมีค่าสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจาก T_w มีค่าต่ำลง ซึ่งแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลมมีค่า Nu สูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3

Al-Damook et. al., [29] กล่าวว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นระหว่างครีบบาง และความเร็วมที่ผ่านรูเจาะมีส่วนช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบ

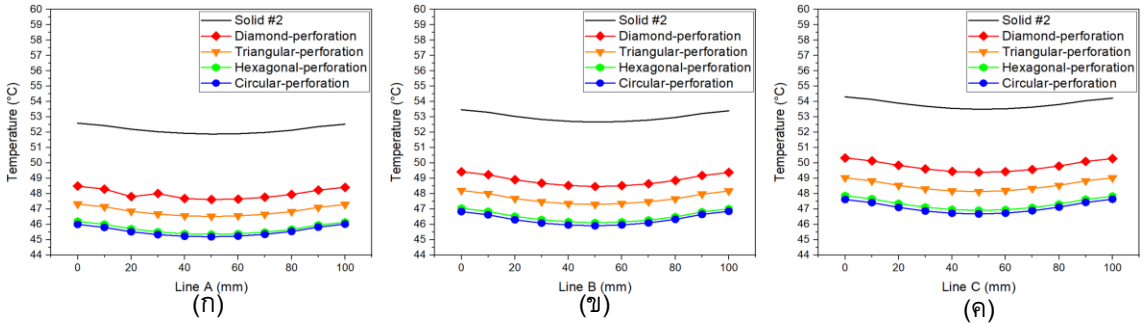
การพาความร้อน ผู้วิจัยจึงวัดค่าเฉลี่ยความเร็วลมในรูเจาะทั้งหมดบนครีบบางวงกลมบนระนาบแนวนอนและแนวตั้ง (U_{Hole}) พบว่าค่า U_{Hole} แปรผันตรงตามค่า Nu ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 9 ซึ่งแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบางวงกลมมีค่า U_{Hole} สูงที่สุด

ตารางที่ 3 ผลของการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษาผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

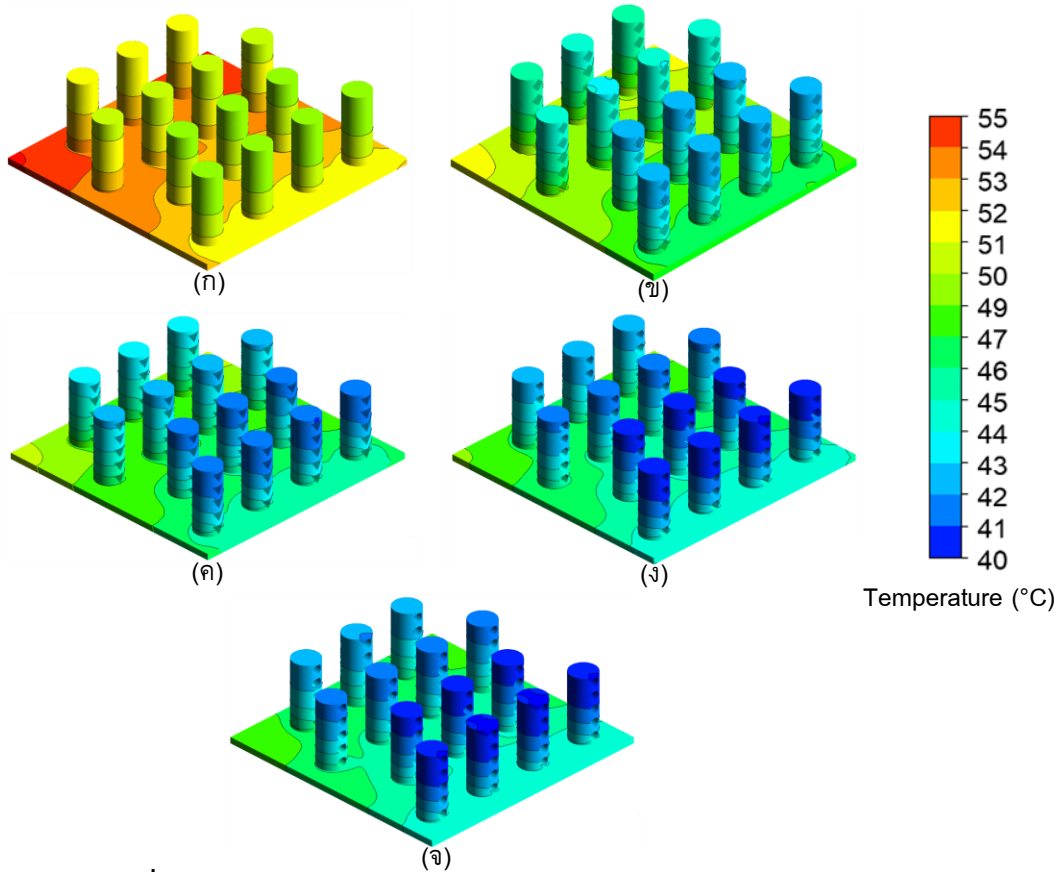
Pin-fin Heat Sinks	T_w (°C)	Nu	U_{Hole} (m/s)
Solid #2	53.038	849.058	0.000
Diamond-perforation	48.904	1,016.064	3.371
Triangular-perforation	47.706	1,079.930	3.420
Hexagonal-perforation	46.528	1,144.715	3.625
Circular-perforation	46.337	1,157.011	3.641



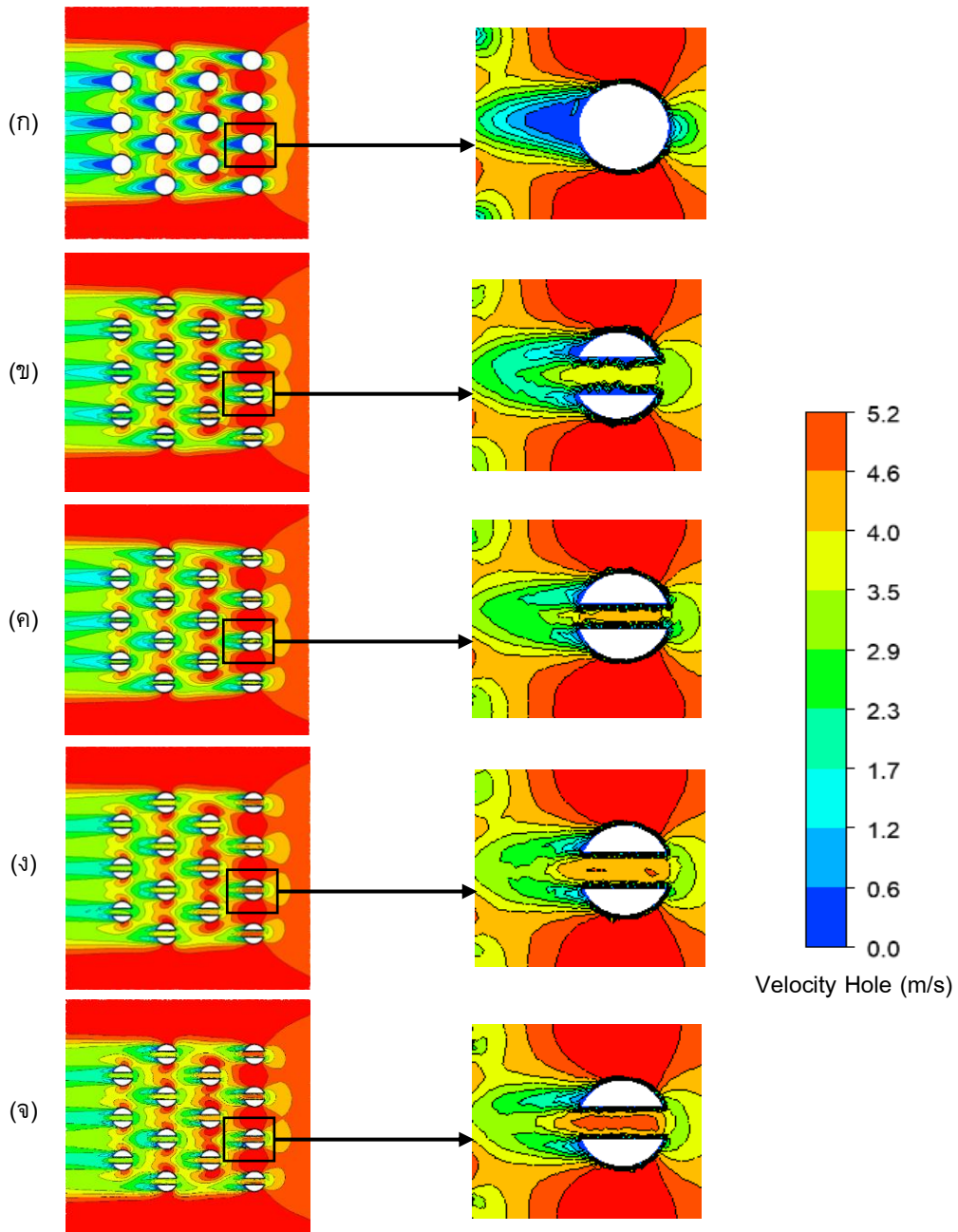
บทความวิจัย



รูปที่ 7 อุณหภูมิบนพื้นฐานของแผงระบายความร้อนแบบค้ำยันแท่งวงกลม Solid #2, Diamond-perforation, Triangular-perforation, Hexagonal-perforation และ Circular-perforation (ก) Line A (ข) Line B และ (ค) Line C



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิของแผงระบายความร้อนแบบค้ำยันแท่งวงกลม: (ก) Solid #2, (ข) Diamond-perforation, (ค) Triangular-perforation, (ง) Hexagonal-perforation และ (จ) Circular-perforation



รูปที่ 9 ความเร็วลมบนระนาบแนว Horizontal 3 ของแผงระบายความร้อนแบบคี่รับแท่งวงกลม: (ก) Solid #2, (ข) Diamond-perforation, (ค) Triangular-perforation, (ง) Hexagonal-perforation และ (จ) Circular-perforation



3.2 ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่กั่วงกลมต่อความดันลดของแผงระบายความร้อน

จากการจำลองเชิงตัวเลขของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบั่กั่วงกลม ได้แก่รูปร่างวงกลม รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม พบว่า ΔP เท่ากับ 6.782Pa, 6.851Pa, 7.126Pa และ 7.310Pa ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของขนาดพื้นที่หน้าตัดตามแนวขวางของรูเจาะ (A_{Hole}) ที่ตั้งฉากกับการไหลของลมส่งผลกระทบต่อให้ ΔP นั้นลดลง ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบั่กั่วงกลมที่มีค่า A_{Hole} สูงที่สุด จะมีค่า ΔP ต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาด A_{Hole} ที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้อากาศไหลผ่านได้ง่ายขึ้น

3.3 ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่กั่วงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

จากการจำลองเชิงตัวเลขของแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบั่กั่วงกลม ได้แก่รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม พบว่ามีค่า TEF เท่ากับ 1.236, 1.303, 1.411 และ 1.431 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่กั่วงกลมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu / Nu_0) ต่อการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน $(f / f_0)^{1/3}$ ซึ่งทำให้มีค่า TEF ที่ต่างกัน ซึ่งพบว่าการเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบั่กั่วงกลมของแผงระบายความร้อนมีค่า TEF สูงที่สุด

ตารางที่ 4 ผลของการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษาของผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่กั่วงกลมต่อความดันลดของแผงระบายความร้อน

Pin-fin Heat Sinks	ΔP (Pa)	A_{Hole} (mm ²)
Circular-perforation	6.782	15.344
Hexagonal-perforation	6.851	14.420
Diamond-perforation	7.126	13.213
Triangular-perforation	7.310	11.176
Solid #2	7.855	0.000

ตารางที่ 5 ผลของการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษาของผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบั่กั่วงกลมต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผงระบายความร้อน

Pin-fin Heat Sinks	Nu	f	TEF
Solid #2	849.058	0.197	1.000
Diamond-perforation	1,016.064	0.179	1.236
Triangular-perforation	1,079.930	0.184	1.303
Hexagonal-perforation	1,144.715	0.172	1.411
Circular-perforation	1,157.011	0.170	1.431

4. บทสรุป

จากการออกแบบรูปร่างรูเจาะบนครีบบั่กั่วงกลมของแผงระบายความร้อนมีดังนี้ รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างหกเหลี่ยม โดยอ้างอิงขนาดและตำแหน่งแผงระบายความร้อนแบบเจาะรูรูปร่างวงกลมบนครีบบั่กั่วงกลมหรือ Design No. 1 ที่มีค่า ISA/TVH เท่ากับ 0.54 mm⁻¹ เพื่อควบคุมตัวแปรของพื้นที่ผิวของแผงระบายความร้อนที่มีผลกระทบต่อ



ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้มีค่าคงที่ โดยใช้สมการสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (TEF) มาวิเคราะห์ผลกระทบของรูปร่างรูเจาะต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมต่อ TEF ของแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลม ซึ่งมีข้อสรุปผลจากการจำลองเชิงวิธีเชิงตัวเลขได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu) ที่สูงขึ้นเนื่องมาจากการเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมเมื่อเปรียบเทียบกับครีบบางวงกลมทึบของแผงระบายความร้อน มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า Nu สูงที่สุด

- ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu) ที่สูงขึ้นเนื่องจากค่าเฉลี่ยความเร็วลมในรูเจาะทั้งหมดบนครีบบางวงกลมบนระนาบแนวนอนและแนวตั้ง (U_{Hole}) ที่สูงขึ้นมีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า U_{Hole} มีค่าสูงที่สุด

- ความดันลด (ΔP) ที่ลดลงเนื่องมาจากการเจาะรูรูปร่างต่าง ๆ บนครีบบางวงกลมเมื่อเปรียบเทียบกับครีบบางวงกลมทึบของแผงระบายความร้อน มีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างวงกลม รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า ΔP มีค่าต่ำที่สุด

- ผลกระทบของรูปร่างการเจาะรูบนครีบบางวงกลมต่อความดันลด (ΔP) ที่ลดลงของแผงระบายความร้อนเนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดตามแนวขวางของรูเจาะ (A_{Hole}) ที่เพิ่มขึ้น มีค่าจากสูงไปต่ำดังนี้ รูปร่างวงกลม

รูปร่างหกเหลี่ยม รูปร่างเพชร และรูปร่างสามเหลี่ยม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า A_{Hole} มีค่าสูงที่สุด

- เนื่องจากรูปร่างการรูเจาะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Nu / Nu_0) และการสูญเสียความดันภายในระบบที่เกิดจากแรงเสียดทาน (f / f_0)^{1/3} จึงทำให้มีค่า TEF ที่ต่างกัน โดยมีค่าจากต่ำไปสูงดังนี้ รูปร่างเพชร รูปร่างสามเหลี่ยม รูปร่างหกเหลี่ยม และรูปร่างวงกลม ซึ่งการเจาะรูรูปร่างวงกลมมีค่า TEF มีค่าสูงที่สุด และเมื่อเทียบกับแผงระบายความร้อนแบบครีบบางวงกลมทึบ TEF เพิ่มขึ้นถึง 43.1 %

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2020-GRAD-05

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Altaf, A. Tariq, S.W. Ahmad, G. Hussain, T.A.H. Ratlamwala and H.M. Ali, Thermal and hydraulic analysis of slotted plate fins heat sinks using numerical and experimental techniques, Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 35, 102109.
- [2] K. Nilpueng, H.S. Ahn, D.W. Jerng and S. Wongwises, Heat transfer and flow characteristics of sinusoidal wavy plate fin heat sink with and without crosscut flow control, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137, 565-572.



- [3] M.A.H. Abdelmohimen, K. Almutairi, M.A. Elkotb, H.E. Abdelrahman and S. Algarni, Numerical investigation of using different arrangement of fin slides on the plate-fin heat sink performance, *Thermal Science*, 2021, 25(6B), 4683-4693.
- [4] E.C. Silva, Á.M. Sampaio and A.J. Pontes, Evaluation of active heat sinks design under forced convection-effect of geometric and boundary parameters, *Materials*, 2021, 14, 2041.
- [5] D. Soodphakdee, M. Behnia and D.W. Copeland, A comparison of fin geometries for heatsinks in laminar forced convection: part i – round, elliptical, and plate fins in staggered and in-line configurations, *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, 2001, 24(1), 68-76.
- [6] E.H. Muhammad, A comparison of the heat transfer performance of a hexagonal pin fin with other types of pin fin heat sinks, *International Journal of Science and Research*, 2015, 4(9), 1781-1789.
- [7] K. Bilen, U. Akyol and S. Yapici, Heat transfer and friction correlations and thermal performance analysis for a finned surface, *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(9), 1071-1083.
- [8] O.N. Şara, Performance analysis of rectangular ducts with staggered square pin fins, *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(11), 1787-1803.
- [9] P. Naphon and A. Sookkasem, Investigation on heat transfer characteristics of tapered cylinder pin fin heat sinks, *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(10), 2671-2679.
- [10] B. Sahin and A. Demir, Thermal performance analysis and optimum design parameters of heat exchanger having perforated pin fins, *Energy conversion and management*, 2008, 49(6), 1684-1695.
- [11] B. Sahin and A. Demir, Performance analysis of a heat exchanger having perforated square fins, *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5-6), 621-632.
- [12] M. Baruah, A. Dewan and P. Mahanta, Performance of elliptical pin fin heat exchanger with three elliptical perforations, *CFD Letters*, 2011, 3(2), 65-73.
- [13] A. Al-Damook, N. Kapur, J.L. Summers and H.M. Thompson, An experimental and computational investigation of thermal air flows through perforated pin heat sinks, *Applied thermal engineering*, 2015, 89, 365-376.



- [14] A. Al-Damook, J.L. Summers, N. Kapur and H. Thompson, Effect of temperature-dependent air properties on the accuracy of numerical simulations of thermal airflows over pinned heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 78, 163-167.
- [15] V.V. Dhole, V.S. Shinde and S.S. Kore, Thermal and hydraulic performance analysis of cylindrical pin fin heat sink with conical perforations, *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2016, 5, 436-440.
- [16] W. Al-Sallami, A. Al-Damook and H.M. Thompson, A numerical investigation of thermal airflows over strip fin heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 75, 183-191.
- [17] C.H. Wu, H.W. Tang and Y.T. Yang, Numerical simulation and optimization of turbulent flows through perforated circular pin fin heat sinks, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2017, 71(2), 172-188.
- [18] A.S. Tijani and N.B. Jaffri, Thermal analysis of perforated pin-fins heat sink under forced convection condition, *Procedia Manufacturing*, 2018, 24, 290-298.
- [19] M. Hatem, H. Abdellatif and W. Hussein, Enhancement of perforated pin-fins heat sink under forced convection, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, 7(10), 1440-1445.
- [20] N.A. Ghyadh, S.S Ahmed and M.A.R.S. Al-Baghdadi, Enhancement of forced convection heat transfer from cylindrical perforated fins heat sink-CFD study, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2021, 44(3), 407-419.
- [21] S.S. Kore, R. Yadav, S. Chinchankar, P. Tipole and V. Dhole, Experimental investigations of conical perforations on the thermal performance of cylindrical pin fin heat sink, *International Journal of Ambient Energy*, 2022, 43(1), 3431-3442.
- [22] S.B. Chin, J.J. Foo, Y.L. Lai and T.K.K. Yong, Forced convective heat transfer enhancement with perforated pin fins, *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49, 1447-1458.
- [23] C.H. Huang, Y.C. Liu and H. Ay, The design of optimum perforation diameters for pin fin array for heat transfer enhancement, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 84, 752-765.



- [24] C.H. Huang and M.H. Chen, An estimation of the optimum shape and perforation diameters for pin fin arrays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131, 72-84.
- [25] Y.T. Yang and H.S. Peng, Numerical study of the heat sink with un-uniform fin width designs, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(15-16), 3473-3480.
- [26] A. Boonloi and W. Jedsadaratanachai, Numerical investigation on turbulent forced convection and heat transfer characteristic in a square channel with discrete combined V-baffle and V-orifice, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2016, 8, 226-235.
- [27] A. Boonloi and W. Jedsadaratanachai, Numerical study on flow and heat transfer mechanisms in the heat exchanger channel with V-orifice at various blockage ratios, gap spacing ratios, and flow directions, *Modelling and Simulation in Engineering*, 2019, 2019, 8656435.
- [28] A. Boonloi and W. Jedsadaratanachai, CFD analysis on heat transfer characteristics and fluid flow structure in a square duct with modified wavy baffles, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 29, 101660.
- [29] A. Al-Damook, N. Kapur, J.L. Summers and H.M. Thompson, Computational design and optimisation of pin fin heat sinks with rectangular perforations, *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105, 691-703.