

วิธีการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุดสำหรับอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่น
ส่วนที่ 2: การหาค่าเหมาะที่สุดโดยมีเงื่อนไขบังคับ

Entropy Generation Minimization for Plate-Fin Heat Sinks

Part 2: Constrained Optimization

สังคม ศรีสมพร* ชัยศิลป์ ชินพรเจริญพงศ์ จำลอง ลิ้มตระกูล และ สุจินต์ บุรีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002
โทร. 043-202845 แฟกซ์ 043-202849 E-mail: sungkomjustin@gmail.com

Sungkom Srisomporn*, Chaisin Chinporcharoenpong, Jumlong Limtragool and Sujin Bureerat
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen, 40002
Tel.: +66-43-202845 Fax: +66-43-202849 E-mail: sungkomjustin@gmail.com

*นักศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

การหาขนาด วัสดุ และความเร็วอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบัฟเฟ่นด้วยวิธีการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด โดยมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเป็นสมการวัตถุประสงค์ และมีเงื่อนไขบังคับเป็นข้อจำกัดทางเรขาคณิตของตัวอุปกรณ์ระบายความร้อนและประสิทธิภาพของครีบบัฟเฟ่นระบายความร้อน แล้วหาผลเฉลยของตัวแปรออกแบบ 4 ตัว ได้แก่ จำนวนครีบบัฟเฟ่น (N), ความหนา (d), ความสูง (H) ของครีบบัฟเฟ่นและความเร็วเข้าสู่อากาศ (V_f) ในการแก้ปัญหาแบ่งออกเป็น 2 กรณีตามจำนวนของตัวแปรค่าตั้งนี้ กรณีที่ 1 N, H และ d (กำหนดค่า $V_f = 2$ เมตรต่อวินาที) กรณีที่ 2 N, H, d และ V_f โดยในแต่ละกรณีใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K_s) เป็น 50, 100, 200 และ 400 W/m-K ตามลำดับ กรณีที่ 1 ได้ค่า N ประมาณ 20 สำหรับทุกค่า K_s และพบว่าเมื่อใช้วัสดุที่มีค่า K_s สูงขึ้นครีบบัฟเฟ่นจะมีความยาวและความบางเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีการระบายความร้อนโดยรวมดีขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่แผ่นฐานลดลงได้มากถึงประมาณ 6 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่แผ่นฐานของกรณีที่มีค่า $K_s = 50$ กรณีที่ 2 ได้ค่า N เท่ากับ 26 และ V_f เท่ากับ 3 เมตรต่อวินาทีโดยประมาณสำหรับทุกค่า K_s ส่วนแนวโน้มเมื่อใช้วัสดุที่มีค่า K_s สูงขึ้นนั้นเป็นแบบเดียวกับกรณีที่ 1 แต่มีการระบายความร้อนดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า K_s เดียวกัน กรณีที่ 2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่แผ่นฐานทำนองเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว พบว่าอุณหภูมิที่แผ่นฐานลดลงไปได้มากถึง 8 องศาเซลเซียส

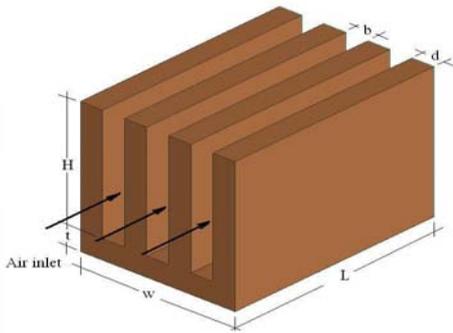
Abstract

A plate-fin heat sink problem was studied for the optimum for the dimensions, material, and the required air velocity by the minimum entropy generation method. The optimization had the following constraints: geometric dimension limits and fin efficiency. For case 1, the unknowns are: number of fin (N), fin height (H), and fin thickness (d), while air approach velocity (V_f) equal to 2 m/s was given. For case 2, the unknown design parameters are: N, H, d , and V_f . In addition, the variation of thermal conductivity (K_s) of 50, 100, 200, and 400 W/m-K were also investigated in both cases. The number of fin, $N \approx 20$ was obtained in case 1 for all values of K_s . The increase in K_s resulted in a longer fin dimension and a lower base plate temperature, up to 6 °C as compared to that of the case when $K_s = 50$. In case 2, $N \approx 26$ and $V_f \approx 3$ m/s were observed. The increase in K_s showed the same trend as those observed in case 1. The reduction in base plate temperature was up to 8 °C comparing to the case when $K_s = 50$.

1. บทนำ

ความต้องการอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเกิดขึ้นเนื่องจากในปัจจุบันชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดกะทัดรัดและความหนาแน่นเชิงความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนมีข้อจำกัดมากมาย ทั้งข้อจำกัดทางด้านกายภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เอง ข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีการ

ผลิตและข้อจำกัดด้านสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวอุปกรณ์ระบายความร้อน ปัจจุบันอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคืออุปกรณ์ระบายความร้อนแบบมีครีบบนที่ใช้อากาศในการระบายความร้อนดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีครีบบนโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คืออัตราการเกิดเอนโทรปีน้อยที่สุด ในการออกแบบได้พิจารณาถึงข้อจำกัดของเทคโนโลยีการผลิตและอิทธิพลของสมบัติวัสดุต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 1 อุปกรณ์ระบายความร้อนแบบครีบบน

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ระบายความร้อน

ในการออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อน ความต้านทานความร้อน (Thermal resistance) และความดันตก (Pressure drop) เป็นตัวแปรที่แสดงถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ระบายความร้อน ในการคำนวณค่าของตัวแปรทั้งสองของการศึกษาครั้งนี้กำหนดขอบเขตและตั้งสมมติฐานไว้ดังนี้

1. การไหลของอากาศราบเรียบ คงตัวและเป็นการไหลแบบ 2 มิติ
2. อากาศเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้และมีสมบัติคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
3. เป็นการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนแบบบังคับ
4. ไม่มีอากาศไหลบายพาส (by pass)
5. ไม่มี การถ่ายเทความร้อนที่ปลายครีบบน
6. ภาวะความร้อนกระจายสม่ำเสมอตลอดฐานของอุปกรณ์ระบายความร้อน
7. ความเร็วของอากาศสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของการไหล

2.1 ความต้านทานความร้อน

จากพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน [1] สามารถคำนวณความต้านทานความร้อนรวม (Overall thermal resistance) ของอุปกรณ์ระบายความร้อนได้ดังนี้

$$R_{hs} = \frac{\theta_b}{Q} = \frac{L}{\frac{N}{R_{fin}} + \frac{(N-1)}{R_{unfin}}} + \frac{t}{k_s LW} \quad (1)$$

โดยที่ R_{hs} คือความต้านทานความร้อนรวมของอุปกรณ์ระบายความ

ร้อน, θ_b คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิของฐานอุปกรณ์ระบายความร้อนกับอุณหภูมิของอากาศขาเข้า, Q คือความร้อนที่ต้องการถ่ายเทออกจากอุปกรณ์, N คือจำนวนครีบบนระบายความร้อน, k_s คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ระบายความร้อน, L, W, t คือความยาว, ความกว้างและความหนาของฐานอุปกรณ์ระบายความร้อนตามลำดับ ความต้านทานความร้อนของครีบบน, R_{fin} , และความต้านทานความร้อนส่วนที่ไม่มีครีบบน, R_{unfin} , สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) ดังนี้

$$R_{fin} = \frac{1}{hA_f \eta_f} \quad (2)$$

$$R_{unfin} = \frac{1}{hbL} \quad (3)$$

เมื่อ $A_f = 2HL$ คือพื้นที่ผิวของครีบบน, b คือช่องว่างระหว่างครีบบน, H คือความสูงของครีบบนระบายความร้อน ประสิทธิภาพของครีบบน, η_f , คำนวณได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$\eta_f = \frac{\tanh(mH)}{mH} \quad (4)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_s \cdot d}} \quad (5)$$

โดยที่ d คือความหนาของครีบบนและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, h , คำนวณได้จากสมการนัสเซลท์-นัมเบอร์ (Nusselts number) ที่พัฒนาขึ้นโดย Teerstra et al. [2] ดังนี้

$$Nu = \left[\left(\frac{Re_{ch}^* \cdot Pr}{2} \right)^{-3} + \left(0.664 \sqrt{Re_{ch}^* \cdot Pr} \frac{1}{3} \sqrt{1 + \frac{3.65}{\sqrt{Re_{ch}^*}}} \right)^{-3} \right]^{-1/3} \quad (6)$$

เมื่อ Pr คือ Prandtl number และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ปรับปรุง (Modified channel Reynolds number), Re_{ch}^* , หาได้จากสมการที่ (7) และสมการที่ (8) ดังนี้

$$Re_{ch}^* = Re_{ch} \cdot \frac{b}{L} \quad (7)$$

$$Re_{ch} = \frac{V_{ch} \cdot b}{\nu} \quad (8)$$

โดยที่ v คือสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ของอากาศ และค่าความเร็วของการไหลในช่อง, V_{ch} , หาได้ดังนี้

$$V_{ch} = V_f \left(1 + \frac{d}{b} \right) \quad (9)$$

เมื่อ V_f คือความเร็วของอากาศเฉลี่ย จากสมการที่ (6) – สมการที่ (9) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{Nu \cdot k_{fl}}{b} \quad (10)$$

เมื่อ k_{fl} คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

2.2 ความดันลด

ค่าความดันลดคร่อมอุปกรณ์ระบายความร้อนสามารถหาได้จากสมการของแรงที่กระทำกับอุปกรณ์ระบายความร้อนดังนี้[3]

$$\Delta P = \left(\frac{\rho V_{ch}^2}{2} \right) \left[\frac{f_{app} \cdot N(2HL + bL)}{HW} + K_c + K_e \right] \quad (11)$$

โดยที่ Apparent friction factor, f_{app} , คำนวณได้จากสมการที่พัฒนาโดย Muzychka and Yovanovich [4] ดังนี้

$$f_{app} \cdot Re_{D_h} = \left[\left(\frac{3.44}{\sqrt{L^*}} \right)^2 + (f Re_{D_h})^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

โดยที่

$$L^* = \frac{L}{D_h Re_{D_h}} \quad (13)$$

$$Re_{D_h} = \frac{V_{ch} \cdot D_h}{\nu} \quad (14)$$

เมื่อ Re_{D_h} คือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของช่องการไหลและ D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ของช่องทางการไหล สำหรับค่า $f Re_{D_h}$, สัมประสิทธิ์การยุบตัวอย่างกะทันหัน, K_c , และสัมประสิทธิ์การขยายตัว, K_e , คำนวณได้จากสมการที่ (15) – (17)

$$\begin{aligned} f Re_{D_h} = & 24 - 32.527 \left(\frac{b}{H} \right) + 46.721 \left(\frac{b}{H} \right)^2 \\ & - 40.829 \left(\frac{b}{H} \right)^3 + 22.954 \left(\frac{b}{H} \right)^4 \\ & - 6.089 \left(\frac{b}{H} \right)^5 \end{aligned} \quad (15)$$

$$K_c = 0.42 \left[1 - \left(1 - \frac{N \cdot d}{W} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$K_e = \left[1 - \left(1 - \frac{N \cdot d}{W} \right)^2 \right]^2 \quad (17)$$

3. อัตราการเกิดเอนโทรปี

อัตราการเกิดเอนโทรปีสำหรับอุปกรณ์ระบายความร้อนที่เสนอโดย Bejan [5], [6] สามารถวิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่หนึ่ง, กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์, สมการสมดุลมวล และสมการของของกิบส์ (Gibb's equation), ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอัตราการเกิดของเอนโทรปีภายนอกอันเนื่องมาจากการไหลผ่านครีบของอากาศและภาวะความร้อนได้ตามสมการที่ (18)

$$\dot{S}_{gen,external} = \iint_A q' \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_w} \right) d\sigma + \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho T_a} \quad (18)$$

และสมการอัตราการเกิดของเอนโทรปีภายในครีบระบายความร้อนดังนี้

$$\dot{S}_{gen,internal} = \iint_A \frac{q'}{T_w} d\sigma - \frac{Q_b}{T_b} \quad (19)$$

โดยที่ T_w คืออุณหภูมิที่ผิวครีบระบายความร้อน, q' คือค่าความร้อนต่อตารางเมตร, σ คือระยะพิกต์ของพื้นที่, Q_b คือความร้อนที่ฐานของอุปกรณ์ระบายความร้อนและ $\dot{m} = \rho H W V_f$ คืออัตราการไหลมวลของอากาศ ในขณะที่ T_a และ T_b คืออุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอุณหภูมิที่ฐานของอุปกรณ์ระบายความร้อนตามลำดับ อัตราการเกิดเอนโทรปีรวมของอุปกรณ์ระบายความร้อนคือผลรวมของอัตราการเกิดเอนโทรปีภายนอกและอัตราการเกิดเอนโทรปีภายในครีบระบายความร้อน ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\dot{S}_{gen} = \frac{Q \theta_b}{T_a^2} + \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho T_a} \quad (20)$$

จากสมการที่ (1) และสมการที่ (20) สามารถเขียนอัตราการเกิดเอนโทรปีให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของความต้านทานความร้อนรวมของอุปกรณ์ระบายความร้อนได้ดังสมการที่ (21)

$$\dot{S}_{gen} = \frac{Q^2 R_{hs}}{T_a^2} + \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho T_a} \quad (21)$$

4. ขั้นตอนการหาค่าเหมาะที่สุด

การศึกษาครั้งนี้เป็นการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีครีบแผ่นโดยใช้วิธีอัตราการเกิดเอนโทรปีน้อยที่สุดเป็น

สมการวัตถุประสงค์ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ (21) สมการทางคณิตศาสตร์ของการหาค่าเหมาะที่สุดเป็นดังนี้

$$\text{Minimize (or Maximize)} \quad \dot{S}_{gen} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (22)$$

Subject to:

$$\begin{aligned} g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq 0 & j = 1, \dots, m \\ h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 & k = 1, \dots, p \\ a_i &\leq x_i \leq b_i \end{aligned} \quad (23)$$

โดยที่ g_j คือเงื่อนไขบังคับแบบไม่เท่ากับ (Inequality constraint) และ h_k คือเงื่อนไขบังคับแบบเท่ากับ (Equality constraint) ของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด ส่วน a_i และ b_i คือขอบเขตล่างและขอบเขตบนของตัวแปรในระบบ ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับนิยมใช้วิธีตัวคูณของลากราง์ (Lagrange multiplier method) เพื่อเปลี่ยนปัญหาให้กลายเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข ซึ่งจะได้อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} L(x_1 \dots x_n, \beta_1 \dots \beta_m, \lambda_1 \dots \lambda_p) &= \dot{S}_{gen}(x_i) + \\ &\sum_{j=1}^m \beta_j g_j(x_i) + \sum_{k=1}^p \lambda_k h_k(x_i) \end{aligned} \quad (24)$$

โดยที่ β_j และ λ_k เป็นตัวคูณของลากราง์ (Lagrange multiplier) ทำการแก้ปัญหาตามสมการที่ (24) เพื่อหาค่า x_i, β_j, λ_k ที่เหมาะที่สุด โดยใช้ระบบสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_j} = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_k} = 0 \quad k = 1, \dots, p \quad (27)$$

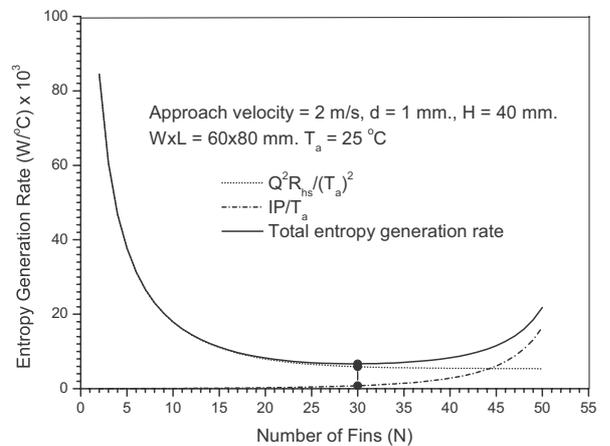
ระบบสมการที่ (25) - (27) สามารถแก้ได้ด้วยวิธีคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งในบทความนี้ใช้วิธีควอไซ-นิวตัน (Quasi-Newton Method) สำหรับการแก้ปัญหาหลายตัวแปร

5. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

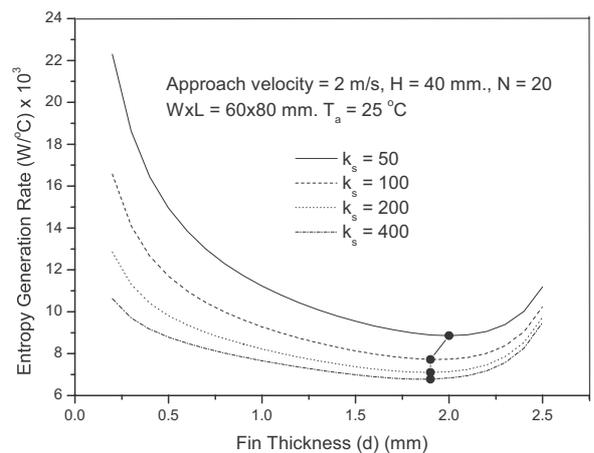
การหาค่าเหมาะที่สุดครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกขนาดของครีบบนที่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีขนาดของฐาน 60 x 80 x 2 มิลลิเมตร ($W \times L \times t$) ที่ใช้ในการระบายความร้อนจำนวน 50 วัตต์ออกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของบรรยากาศเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดเอนโทรปีรวม, อัตราการเกิดเอนโทรปีเนื่องจากภาวะความร้อน และอัตราการเกิดเอนโทรปีเนื่องจากแรงเสียดทานการไหล

ของอากาศกับจำนวนครีบบระบายความร้อน พบว่าอัตราการเกิดเอนโทรปีเนื่องจากภาวะความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนครีบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวในการระบายความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานความร้อนของอุปกรณ์ระบายความร้อนลดลง แต่อัตราการเกิดเอนโทรปีเนื่องจากแรงเสียดทานการไหลของอากาศมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อจำนวนครีบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อจำนวนครีบบมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการไหลของอากาศสูงขึ้นจึงต้องใช้พลังงานในการผลักดันอากาศให้ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนสูงขึ้นด้วย ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเอนโทรปีและจำนวนครีบบระบายความร้อนแสดงไว้ในรูปที่ 2

นอกจากตัวแปรรูปร่างของอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปีแล้ว สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ระบายความร้อนก็มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปีด้วยเช่นกัน



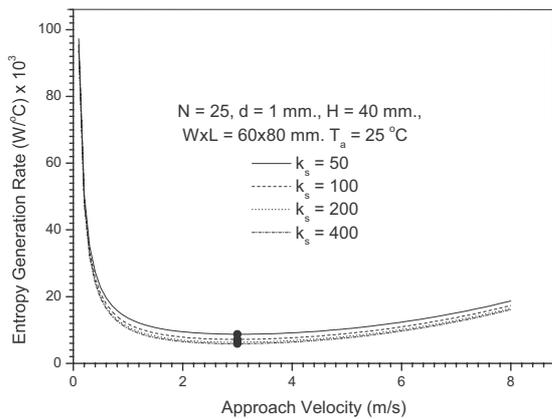
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเอนโทรปีกับจำนวนครีบบ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเอนโทรปีกับความหนาของครีบบระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุ

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเอนโทรปีกับความหนาของครีบบระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ระบายความร้อน โดย

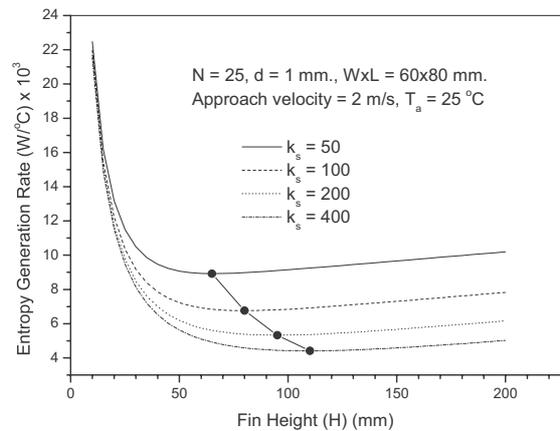
ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ 50, 100, 200, และ 400 W/mK ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงอัตราการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ($50 > 100 > 200 > 400$) รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเอนโทรปีกับความเร็วของอากาศขาเข้าเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ผลการศึกษาสอดคล้องกับผลการศึกษาที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 นั่นคือวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงอัตราการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเอนโทรปีกับความเร็วของอากาศขาเข้าอุปกรณ์ระบายความร้อนเฉลี่ยเมื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุ

ข้อสังเกตจากผลการศึกษาในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ก็คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ระบายความร้อนมีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปีเท่านั้น แต่ไม่มีผลต่อค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรออกแบบ เช่นจากรูปที่ 3 ค่าความหนาของครีบบระบายความร้อนที่ทำให้อัตราการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุดของทุกค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ที่ 1.9 – 2 มิลลิเมตร และจากรูปที่ 4 ค่าความเร็วของอากาศขาเข้าอุปกรณ์ระบายความร้อนเฉลี่ยที่ทำให้อัตราการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุดของทุกค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ที่ 3 เมตรต่อวินาทีเท่ากัน และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของครีบบระบายความร้อนกับอัตราการเกิดเอนโทรปีเมื่อเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุพบว่าวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงจะทำให้อัตราการเกิดเอนโทรปีต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา (ผลการศึกษาแสดงไว้ในรูปที่ 5)

นอกจากการศึกษาดังอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพทางความร้อนและอัตราการเกิดเอนโทรปีของอุปกรณ์ระบายความร้อนแล้ว วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคั้งนี้คือการศึกษาค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีครีบบแบบแผ่นแบบมีเงื่อนไขบังคับ โดยแบ่งการศึกษาค้นหาออกเป็น 2 กรณี คือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ 3 ตัวแปรออกแบบและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ 4 ตัวแปรออกแบบตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเอนโทรปีกับความสูงของครีบบระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุ

5.1 การออกแบบหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ

เนื่องจากการออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนเพื่อใช้งานจริงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขบังคับด้านรูปร่างและขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงความสามารถของเทคโนโลยีด้านการผลิตด้วย ดังนั้นการศึกษาคั้งนี้จึงนำเสนอการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์ระบายความร้อนแบบมีเงื่อนไขบังคับเพื่อให้สอดคล้องกับการออกแบบใช้งานจริง โดยแบ่งการศึกษาค้นหาออกเป็นสองกรณีคือการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 3 ตัวแปรออกแบบและการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 4 ตัวแปรออกแบบตามลำดับ และในแต่ละกรณีทำการศึกษาค้นหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 50, 100, 200, และ 400 W/mK ตามลำดับ เงื่อนไขบังคับของการศึกษาค้นหาแสดงไว้ในสมการที่ (28) – สมการที่ (32) ดังนี้

$$g_1 : 1 - b \leq 0 \quad (28)$$

$$g_2 : b - 5 \leq 0 \quad (29)$$

$$g_3 : 5 - \frac{H}{b} \leq 0 \quad (30)$$

$$g_4 : \frac{H}{b} - 25 \leq 0 \quad (31)$$

$$g_5 : 0.8 - \eta_f \leq 0 \quad (32)$$

โดยที่สมการที่ (28) และสมการที่ (29) เป็นเงื่อนไขการผลิตของช่องว่างระหว่างครีบบระบายความร้อน [7], สมการที่ (30) และสมการที่ (31) เป็นเงื่อนไขความสามารถในการผลิตของอัตราส่วนระหว่างความสูงของครีบบระบายความร้อนต่อช่องว่างระหว่างครีบบ [8], และสมการที่ (32) เป็นเงื่อนไขบังคับให้ครีบบที่ได้จากการออกแบบมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนสูง สำหรับขอบเขตล่างและขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบกำหนดไว้ดังนี้ $2 \leq N \leq 50$, $25 \text{ mm} \leq H \leq 140 \text{ mm}$, $0.2 \text{ mm} \leq d \leq 2.5 \text{ mm}$ และ $0.5 \leq V_f \leq 3$ ผลการศึกษาค้นหาการออกแบบหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ 3 ตัวแปรออกแบบและ 4 ตัวแปรออกแบบแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุด 3 ตัวแปรออกแบบ N, H, d เมื่อ $V_f = 2$ m/s

k_s	N	H (mm)	d (mm)	\dot{S}_{gen}	b (mm)	H/b	θ_b ($^{\circ}C$)	ΔP (Pa)	Vol. (mm^3)
50	20.64	30.30	1.75	0.00997	1.20	24.93	16.67	48.50	97168.45
100	20.87	39.70	1.35	0.00814	1.60	24.80	13.73	26.56	99116.51
200	20.83	49.70	0.98	0.00699	2.00	24.89	11.87	16.24	90762.51
400	19.99	56.80	0.80	0.00625	2.30	24.53	10.73	12.07	82303.64

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุด 4 ตัวแปรออกแบบ N, H, d , และ V_f

k_s	N	H (mm)	d (mm)	V_f (m/s)	\dot{S}_{gen}	b (mm)	H/b	θ_b ($^{\circ}C$)	ΔP (Pa)	Vol. (mm^3)
50	25.74	25.00	1.37	2.85	0.00934	1.00	24.99	14.13	96.35	80118.28
100	26.95	31.40	1.00	3.00	0.00752	1.30	24.66	11.38	59.07	77316.99
200	26.08	39.90	0.76	3.00	0.00638	1.60	24.91	9.78	36.55	72877.45
400	24.93	47.00	0.60	3.00	0.00568	1.90	24.97	8.76	26.44	65842.98

จากตารางแสดงผลการศึกษาพบว่าในการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุดทั้ง 3 และ 4 ตัวแปรออกแบบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุไม่มีผลต่อจำนวนครีบริบที่เหมาะสมของอุปกรณ์ระบายความร้อน โดยจำนวนครีบริบที่เหมาะสมของการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุด 3 ตัวแปรออกแบบอยู่ที่ประมาณ 20 – 21 ครีบริบ และการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุด 4 ตัวแปรออกแบบอยู่ที่ประมาณ 25 – 26 ครีบริบ แต่สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุมีผลต่อความสูงของครีบริบระบายความร้อน ซึ่งพบว่าความสูงที่เหมาะสมที่สุดของครีบริบระบายความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการศึกษาที่แสดงไว้ในรูปที่ 5 ส่วนค่าผลต่างของอุณหภูมิระหว่างบรรยากาศกับฐานของอุปกรณ์ระบายความร้อน, ความดันลดคร่อมอุปกรณ์ระบายความร้อน และ ปริมาตรของอุปกรณ์ระบายความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อนำรูปร่างที่ได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเท่ากับ 400 W/mK ของทั้งสองกรณีศึกษาไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ “FLUENT” เพื่อเปรียบเทียบผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศขาเข้าหรือบรรยากาศกับอุณหภูมิที่ฐานของอุปกรณ์ระบายความร้อนกับผลต่างที่ได้จากการหาค่าเหมาะที่สุดพบว่าการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุด 3 ตัวแปรออกแบบให้ผลต่างของอุณหภูมิลดลงเคลื่อนจากค่าที่ได้จากโปรแกรมคือ 12 องศาเซลเซียสเท่ากับ -10.58% เมื่อใช้ค่าที่ได้จากโปรแกรมเป็นค่าอ้างอิงในขณะที่การออกแบบหาค่าเหมาะที่สุด 4 ตัวแปรออกแบบมีผลต่างของอุณหภูมิลดลงเคลื่อนจากผลที่ได้จากโปรแกรมคือ 10 องศาเซลเซียสเท่ากับ -12.4% ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากการคำนวณออกแบบใช้สมการการถ่ายเทความร้อนออกจากอุปกรณ์ระบายความร้อนที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการออกแบบหาค่าเหมาะที่สุดทั้ง 3 ตัวแปรออกแบบและ 4 ตัวแปรออกแบบสามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ผลิตจาก

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงจะให้อัตราการเกิดเอนโทรปีที่เหมาะสม, ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของบรรยากาศกับฐานของอุปกรณ์ระบายความร้อน, ความดันลดและปริมาตรของอุปกรณ์ระบายความร้อนมีค่าต่ำกว่าอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ผลิตจากวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า ซึ่งแสดงว่าสามารถระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์ได้ดีและใช้พลังงานในการผลักอากาศน้อยกว่า แต่ทั้งนี้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงส่วนมากจะมีน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสูงด้วยเช่นกัน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ozisik M. Necati, *Basic heat transfer*, McGraw-Hill, c1981.
- [2] P. Teertstra, M.M. Yavanovich and J.R. Culham, “Analytical Forced Convection Modeling of Plate Fin Heat sinks”, *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol. 10, No.4, pp. 253-261, 2000.
- [3] W. M. Kays and A. L. London, *Compact Heat Exchangers*. New York: McGraw-Hill, 1984.
- [4] Y.S. Muzychka and M.M. Yavanovich, “Modeling friction factors in non-circular ducts for developing laminar flow”, 2nd AIAA Theoretical Fluid Mech. Meeting, June 15-18, 1998.
- [5] A. Bejan, *Entropy Generation Minimization*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.
- [6] A. Bejan, *Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow*, New York: Wiley, 1982.
- [7] C.J. Shih and G.C. Liu, “Optimal design methodology of plate-fin heat sinks for electronic cooling using entropy generation strategy”, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol.27 No.3, September 2004.
- [8] <http://www.acktechnology.com>