

อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิ
และ อัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่ของครีบทามแนวยาวที่มีโปรไฟล์
สี่เหลี่ยมและโปรไฟล์สามเหลี่ยมภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน

Effects of Temperature and Relative Humidity of Air on Temperature Distributions and Local Heat Transfer Rate of Longitudinal Fins of Rectangular and Triangular Profiles under Partially Wet Surface Conditions

ทศพล จันทระออ¹ และ วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี*

Totsapon Chanlaor and Worachest Pirompugd

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20131

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : worapiro@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 มิถุนายน 2567 / วันที่แก้ไขบทความ: 9 สิงหาคม 2567 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 31 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ ครีบทามักถูกใช้ในการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลายชนิด โดยเมื่ออุณหภูมิที่ผิวครีบทามมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะทำให้อิอน้ำในอากาศควบแน่นมาเกาะที่ผิวครีบทาม และทำให้ครีบทามอยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ซึ่งจะมีการถ่ายโอนมวล ความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอไปพร้อมๆกัน ในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิและอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่ของครีบทามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยมและโปรไฟล์สามเหลี่ยม โดยครีบทามทั้งสองจะอยู่ภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จะแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิและความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้น อุณหภูมิและอัตราการถ่ายโอนความร้อนตามความยาวครีบทามจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน อีกทั้ง สัดส่วนของผิวเปียกก็จะเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม สำหรับการเพิ่มความชื้นให้กับอากาศนั้น จะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่บริเวณปลายครีบทามทั้งสองชนิด มีค่าลดลง

คำสำคัญ : ครีบทามแนวยาว, โปรไฟล์สามเหลี่ยม, โปรไฟล์สี่เหลี่ยม, สภาวะผิวเปียกบางส่วน

Abstract Fins are the most widely used surface that enhances the heat transfer performance of heat exchangers. When the temperature of fin surface is lower than the dew point

temperature, the water vapor in the moist air will condense and adhere the fin surface. The fin surfaces are under partially wet surface conditions. There is simultaneous mass, sensible heat, and latent heat of vaporization. In this research, the effects of air temperature and relative humidity on the temperature distributions and local heat transfer rates of the longitudinal fins of rectangular and triangular profiles under partially wet surface conditions are presented. From the results of programming, it can see that when the temperature and relative humidity of air increase, the temperature and heat transfer rate of air increase too. Additionally, the proportion of wet surface also increase. However, for the rectangular and triangular profiles, when the relative humidity increases, the local heat transfer rate at fin tip area decreases.

Keywords: Longitudinal fins, Partially wet surface conditions, Rectangular profile, Triangular profile.

1. บทนำ

ครีป เป็นชิ้นส่วนที่นิยมใช้ในการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่างๆ โดยสาเหตุที่ครีปสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนได้นั้น เนื่องจากการติดครีปจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลที่ไหลผ่านครีปกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ อย่างไรก็ตาม ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางประเภท เช่น อีวาโปเรเตอร์หรือเครื่องระเหยนั้น ครีปมักจะอยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน โดยจะมีพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ทำให้อากาศควบแน่นมาเกาะที่ผิวของครีป การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนมากกว่าปกติ โดยจะมีทั้งความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงเกิดขึ้นพร้อมกัน

ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีนักวิจัยหลายคนที่ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสมรรถนะของครีป โดยในระหว่างปี ค.ศ. 1949-1972 Schmidt [1] และ Kern and Kraus [2] ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณการกระจายอุณหภูมิของครีป อัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีป และประสิทธิภาพของครีป ในระหว่างปี ค.ศ. 2005-2009

Asslantu [3], Joneidi et al. [4], และ Kulkarni and Joglekar [5] ได้นำเสนออิทธิพลของค่าการนำความร้อนที่มีต่อสมรรถนะของครีป นอกจากนี้ สำหรับครีปที่อยู่ในสภาวะเปียกนั้น ในปี ค.ศ. 1970 Threlkeld [7] ได้นำเสนอวิธีศักย์เอนทัลปี (Enthalpy potential method) สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศและผิวเปียกซึ่งมีทั้งการถ่ายโอนความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงไปพร้อมกัน นอกจากนี้ Threlkeld [7] ยังได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีปที่อยู่ในสภาวะลดความชื้นหรือครีปเปียกอีกด้วย จากนั้น ในเวลาต่อมา ได้มีนักวิจัยหลายคนที่น่าสนใจสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีปเปียกไปใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนติดครีป เช่น ในปี ค.ศ. 2000 Liang et al. [7] ได้ศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีป โดยมีการนำประสิทธิภาพของครีปเปียกมาใช้ในการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 1 และ 2 มิติ อีกทั้งยังได้นำเสนอประสิทธิภาพของครีปเปียกบางส่วนอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของครีปเปียกบางส่วนที่นำเสนอ

โดย Liang et al. [7] นี้ จะอาศัยการคำนวณจากประสิทธิภาพของครีบบางและประสิทธิภาพของครีบบีกเท่านั้น ในปี ค.ศ. 2007 Pirompugd et al. [8] ซึ่งก็คือ ผู้วิจัยในบทความวิจัยฉบับนี้ ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของ ครีบบวกกลมที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์จากสมการอนุพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ได้สมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีบบวกกลมที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วนอย่างแท้จริง ในปี ค.ศ. 2013 Pirompugd and Wongwises [9] ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีบบางตามแนวยาวที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์จากสมการอนุพันธ์สำหรับการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ได้สมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีบบางตามแนวยาวที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วนอย่างแท้จริง นอกจากนี้ ในปีเดียวกันนี้ คือ ค.ศ. 2013 Pirompugd and Wongwises [10] ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีบบางที่อยู่นอกสภาวะผิวเปียกบางส่วน และในปี ค.ศ. 2021 Pirompugd and Wongwises [11] ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีบบวกกลมที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 2023 Nimmy et al. [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบีกที่มีลักษณะเป็นหางปลาที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน โดยผลลัพธ์ของ Nimmy et al. [12] จะนำเสนอในลักษณะของการกระจายอุณหภูมิ และวิธีในการคำนวณโดยอาศัยโครงข่ายประสาทเทียม ในปี ค.ศ. 2024 Milovancevic et al. [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำความเย็นบนแผ่นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบบีกซึ่งจะมีบางสภาวะที่เป็นผิวเปียกบางส่วน ทว่าในแบบจำลองของ Milovancevic et al. [13] จะอาศัยสมการของครีบบีกทั้งหมดเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Pirompugd and Wongwises [9] หรือผู้วิจัยในบทความวิจัยฉบับนี้ ได้นำเสนอเฉพาะประสิทธิภาพของครีบบางตามแนวยาวที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วนเท่านั้น ในงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้นำเสนอการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีบบีกแต่อย่างใด ดังนั้น ในบทความวิจัยฉบับนี้ คณะผู้วิจัยจะนำเสนอสมการและผลลัพธ์สำหรับการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีบบีก สำหรับครีบบางตามแนวยาวที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจพฤติกรรมของครีบบีกบางส่วนมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังจะนำเสนออิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิอีกด้วย

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในปี ค.ศ. 2013 Pirompugd and Wongwises [9] ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณประสิทธิภาพของครีบบางตามแนวยาวที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ดังสมการที่ 1-4 ดังต่อไปนี้

- โพรไฟล์สี่เหลี่ยม

$$\eta_{\text{rect}} = \frac{\gamma_0 (e^{2M_1 x_{\text{dry}}} + e^{2M_1 b}) - 2\gamma_{\text{dp}} e^{M_1 (x_{\text{dry}} + b)}}{M_1 b \gamma_0 (e^{2M_1 b} - e^{2M_1 x_{\text{dry}}})} \quad \dots (1)$$

- โพรไฟล์สามเหลี่ยม

$$\eta_{\text{tri}} = \frac{I_1 (2M_1 b) \left[K_0 (2M_1 \sqrt{\gamma_{\text{dp}} x_{\text{dry}}}) - \frac{\gamma_{\text{dp}}}{\gamma_0} K_0 (2M_1 b) \right] + K_1 (2M_1 b) \left[I_0 (2M_1 \sqrt{\gamma_{\text{dp}} x_{\text{dry}}}) - \frac{\gamma_{\text{dp}}}{\gamma_0} I_0 (2M_1 b) \right]}{M_1 b \left[I_0 (2M_1 b) K_0 (2M_1 \sqrt{\gamma_{\text{dp}} x_{\text{dry}}}) - I_0 (2M_1 \sqrt{\gamma_{\text{dp}} x_{\text{dry}}}) K_0 (2M_1 b) \right]} \quad \dots (2)$$

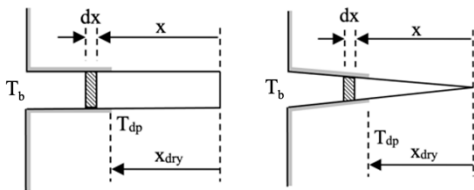
- โพรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า

$$\eta_{\text{cave}} = \frac{(-0.5 + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5}) b^{-1.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} \left[\gamma_{\text{dp}} b^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} - \gamma_{\text{dp}} b^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} \right]}{M_1^2 b \gamma_0 \left[x_{\text{dry}}^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} b^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} - x_{\text{dry}}^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} \right]} + \frac{(-0.5 - 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5}) b^{-1.5} - 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} \left[\gamma_{\text{dp}} b^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} - \gamma_{\text{dp}} b^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} \right]}{M_1^2 b \gamma_0 \left[x_{\text{dry}}^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} b^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} - x_{\text{dry}}^{-0.5} + 0.5(1 + 4M_1^2 b^2)^{0.5} \right]} \quad \dots (3)$$

- โปรไฟล์พาราโบลาโค้งงู

$$\eta_{\text{even}} = \frac{\left(\frac{x_{\text{dry}}}{b}\right)^{-0.25} \frac{\gamma_{\text{dp}}}{\gamma_0} \left[I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) I_{2/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) - I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) I_{2/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) \right]}{M_T b \left[I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b^{0.25} x_{\text{dry}}^{0.75} \right) - I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b^{0.25} x_{\text{dry}}^{0.75} \right) \right]} + \frac{\left[I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b^{0.25} x_{\text{dry}}^{0.75} \right) I_{2/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) - I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b^{0.25} x_{\text{dry}}^{0.75} \right) I_{2/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) \right]}{M_T b \left[I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b^{0.25} x_{\text{dry}}^{0.75} \right) - I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b \right) I_{1/3} \left(\frac{4}{3} M_T b^{0.25} x_{\text{dry}}^{0.75} \right) \right]} \quad \dots (4)$$

อย่างไรก็ตาม Pirompugd and Wongwiset [9] ได้มุ่งเน้นไปที่การนำเสนอสมการเพื่อคำนวณประสิทธิภาพของครีบบตามแนวยาวทั้ง 4 โปรไฟล์ ที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรมเป็นสำคัญ แต่ในบทความดังกล่าวไม่ได้นำเสนอการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีบบ โดยเฉพาะการกระจายอุณหภูมิในครีบบส่วนเปียกซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าครีบบส่วนแห้ง ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการคำนวณการกระจายอุณหภูมิสำหรับครีบบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยมและโปรไฟล์สามเหลี่ยม ที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน



1.1 โปรไฟล์สี่เหลี่ยม 1.2 โปรไฟล์สามเหลี่ยม

รูปที่ 1 ครีบบตามแนวยาวในสภาวะผิวเปียกบางส่วน

จากรูปที่ 1 แสดงครีบบตามแนวยาวในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ซึ่งครีบบมีอุณหภูมิฐานครีบบ เท่ากับ T_b และมีความยาว b ($b \geq x \geq 0$) โดยที่ระยะ $x = x_{\text{dry}}$ ครีบบจะมีอุณหภูมิเท่ากับ T_{dp} หรือ อุณหภูมิจุดนี้ค้าง ทำให้ด้านขวาของครีบบ ($x < x_{\text{dry}}$) จะอยู่ในสภาวะผิวแห้ง

ในขณะที่ด้านซ้ายของครีบบ ($x \geq x_{\text{dry}}$) จะอยู่ในสภาวะผิวเปียก เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำกว่า T_{dp}

ดังนั้น ในการสร้างสมการเพื่ออธิบายการกระจายอุณหภูมิของครีบบ รวมถึงอัตราการถ่ายโอนความร้อนและประสิทธิภาพของครีบบ จะแบ่งการพิจารณา ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของครีบบที่อยู่ในสภาวะผิวแห้ง และส่วนของครีบบที่อยู่ในสภาวะผิวเปียก ดังต่อไปนี้

- ครีบบส่วนแห้ง

สำหรับส่วนแห้ง เมื่ออาศัยความรู้ทางด้านการถ่ายโอนความร้อน จะสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{โปรไฟล์สี่เหลี่ยม : } \frac{d^2\theta}{dx^2} - m\theta = 0 \quad (5)$$

$$\text{โปรไฟล์สามเหลี่ยม : } \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\theta}{dx} - m^2 \frac{b}{x} \theta = 0 \quad (6)$$

$$\text{โดย } \theta = T - T_a \text{ และ } m = \sqrt{\frac{2h}{k_f \delta b}}$$

ในการแก้สมการที่ 5 และ 6 จะต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต

ดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } x = 0 \text{ จะได้ } \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

$$\text{เมื่อ } x = x_{\text{dry}} \text{ จะได้ } \theta|_{x=x_{\text{dry}}} = \theta_{\text{dp}} \quad (8)$$

$$\text{โดย } \theta_{\text{dp}} = T_{\text{dp}} - T_a$$

จากสมการอนุพันธ์ที่ 5 และ 6 และเงื่อนไขขอบเขตจากสมการที่ 7 และ 8 จะสามารถแก้สมการได้ดังต่อไปนี้

$$\text{โปรไฟล์สี่เหลี่ยม : } \theta = \frac{\theta_{\text{dp}} \cosh mx}{\cosh mx_{\text{dry}}} \quad (9)$$

$$\text{โปรไฟล์สามเหลี่ยม : } \theta = \frac{\theta_{dp} I_0(2m\sqrt{bx})}{I_0(2m\sqrt{bx_{dry}})} \quad (10)$$

จากสมการที่ 9 และ 10 จะทำให้สามารถคำนวณหา การกระจายอุณหภูมิของครีปในส่วนแห้ง หรือที่ตำแหน่ง $x < x_{dry}$ ได้ โดย $T = \theta + T_a$

- ครีปส่วนเปียก

สำหรับส่วนเปียก Threlkeld [7] ได้นำเสนอวิธีสก็ชเอนทัลปี และเมื่ออาศัยพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนและสมการอนุพันธ์ จะสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{โปรไฟล์สี่เหลี่ยม : } \frac{d^2\gamma}{dx^2} - M_T\gamma = 0 \quad (11)$$

$$\text{โปรไฟล์สามเหลี่ยม : } \frac{d^2\gamma}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\gamma}{dx} - M_T^2 \frac{b}{x} \gamma = 0 \quad (12)$$

$$\text{โดย } \gamma = i - i_a \text{ และ } M_T = \sqrt{\frac{2h}{k_f \delta_b} \cdot \frac{b_w}{C_{p,a}}}$$

สำหรับ b_w นั้น จะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยจะเป็นไปตามสมการที่ 13 ดังต่อไปนี้

$$b_w' = 0.001971809 \times T^2 + 0.042053208 \times T + 1.707411988 \quad (13)$$

สมการที่ 13 จะในช่วง $0^\circ\text{C} \leq T \leq 15^\circ\text{C}$ เท่านั้น โดยในสมการที่ 13 นี้ b_w' มีหน่วยเป็น kJ/kg/K และ T มีหน่วยเป็น $^\circ\text{C}$

ในงานวิจัยของ Pirompugd and Wongwiset [9] จะนำเสนอปริมาณ M_T ที่แตกต่างออกไป โดยจะคิดอิทธิพลจากความต้านทานความร้อนในส่วนของการนำความร้อนผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปด้วย ซึ่งจะทำให้มี

ความจริงมากกว่า แต่ทว่า ทำให้เกิดความซับซ้อนในการคำนวณอย่างมาก เพราะต้องอาศัยการทำซ้ำ อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ Myers [12] ได้แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของความหนาของฟิล์มน้ำที่มีต่อสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนนั้น มีค่าน้อยมาก โดยมีค่าระหว่าง 0.5-5% อีกทั้ง งานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการถ่ายโอนความร้อนผ่านสภาวะผิวเปียก มักจะละทิ้งค่าดังกล่าว ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงไม่คิดความต้านทานความร้อนจากการนำความร้อนผ่านฟิล์มน้ำ

ในการแก้สมการที่ 11 และ 12 จะต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต ดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } x = x_{dry} \text{ จะได้ } \gamma|_{x=x_{dry}} = \gamma_{dp} \quad (14)$$

$$\text{เมื่อ } x = b \text{ จะได้ } \gamma|_{x=b} = \gamma_0 \quad (15)$$

$$\text{โดย } \gamma_{dp} = i_{dp} - i_a \text{ และ } \gamma_0 = i_0 - i_a$$

จากสมการอนุพันธ์ที่ 11 และ 12 และเงื่อนไขขอบเขตจากสมการที่ 14 และ 15 จะสามารถแก้สมการได้ดังต่อไปนี้

โปรไฟล์สี่เหลี่ยม :

$$\gamma = \frac{\gamma_0 e^{M_T b} - \gamma_{dp} e^{M_T x_{dry}}}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} e^{M_T x} + \frac{\gamma_{dp} e^{(M_T x_{dry} + 2M_T b)} - \gamma_0 e^{(2M_T x_{dry} + M_T b)}}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} e^{-M_T x} \quad (16)$$

โปรไฟล์สามเหลี่ยม :

$$\gamma = \frac{\gamma_0 K_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) \gamma_{dp} K_0(2M_T b)}{I_0(2M_T b) K_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) I_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) K_0(2M_T b)} I_0(2M_T \sqrt{bx}) + \frac{\gamma_{dp} I_0(2M_T b) \gamma_0 I_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}})}{I_0(2M_T b) K_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) I_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) K_0(2M_T b)} K_0(2M_T \sqrt{bx}) \quad (17)$$

จากสมการที่ 16 และ 17 จะสามารถคำนวณการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีปในส่วนผิวเปียกได้ดังนี้

$$T = 2.410601395641530E-05 \times (\gamma + i_u)^3 - 5.364061204560760E-03 \times (\gamma + i_u)^2 + 6.823891300927570E-01 \times (\gamma + i_u) - 5.984605864962960E+00 \quad (18)$$

สำหรับสมการที่ 18 นี้ จะใช้ได้ในช่วง $0^\circ\text{C} \leq T \leq 15^\circ\text{C}$ เท่านั้น โดยในสมการที่ 18 นี้ γ มีหน่วยเป็น kJ/kg และ T มีหน่วยเป็น $^\circ\text{C}$

ในการคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีป จะต้องอาศัยการทำซ้ำ โดยจะต้องสมมติ x_{dry} แล้วคำนวณโปรไฟล์อุณหภูมิตามความยาวครีปในส่วนแห้งและส่วนเปียก จากนั้น จะต้องตรวจสอบความถูกต้อง โดยอาศัยสมการที่ 19 ดังต่อไปนี้

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_{dry}} = b'_{w,dp} \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=x_{dry}} \quad (19)$$

นอกจากนี้ สำหรับครีปตามแนวยาวทั้ง 2 ชนิด คือ ครีปที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยมและครีปที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม สามารถหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่หรืออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ตำแหน่ง x ใดๆ ได้ดังนี้

$$\dot{Q}' = - \frac{k_f A}{b'_w L} \frac{dy}{dx} \quad (20)$$

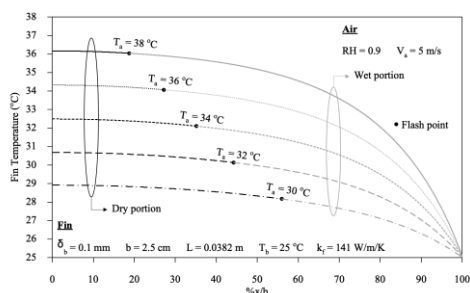
โดย $\dot{Q}'$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่ หรืออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ตำแหน่ง x ใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยความลึกของครีป (W/m), A คือ พื้นที่หน้าตัดของครีปที่ตำแหน่ง x ใดๆ (m^2), k_f คือ ค่าการนำ

ความร้อนของครีป (W/m/K), L คือ ระยะความลึกของครีป (m)

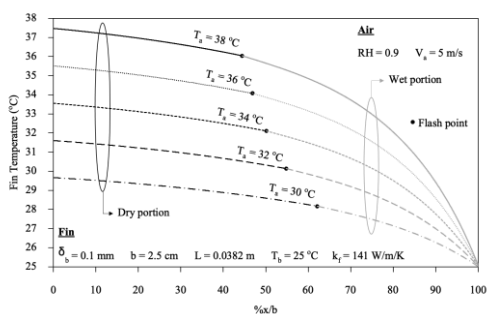
3. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้ จะทำให้สามารถคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีปได้ โดยในรูปที่ 2 จะแสดงการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีป โดยรูปที่ 2.1 จะเป็นครีปตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม และรูปที่ 2.2 จะเป็นครีปตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม ทั้งนี้ จากรูปที่ 2 นั้น สำหรับแกน x จะแสดงระยะไว้หน่วย x/b เป็นร้อยละ โดย $\%x/b = 0$ ก็คือ ตำแหน่งปลายครีป และ $\%x/b = 100$ ก็คือ ตำแหน่งฐานครีป ส่วนแกน y จะแสดงอุณหภูมิของครีป นอกจากนี้ จากรูป จุดสีดำทึบ (Flash point) จะแสดง ตำแหน่งที่แบ่งแยกระหว่าง บริเวณตั้งแต่ปลายครีปจนถึงจุดดังกล่าวที่อยู่ในสภาวะแห้ง และบริเวณตั้งแต่ฐานครีปจนถึงจุดดังกล่าวที่อยู่ในสภาวะเปียก จากรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นครีปที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม จะพบว่า เมื่อ $\%x/b$ ลดลงจาก 100 หรือก็คือระยะตามความยาวครีปที่ลดลงจากฐานครีป อุณหภูมิของครีปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้น เมื่อระยะไว้หน่วย $\%x/b$ ลดลงไปอีก อุณหภูมิของครีปจะเพิ่มขึ้น ช้าลงเรื่อยๆ จนถึง $\%x/b = 0$ หรือที่ปลายครีป อุณหภูมิของครีปจะมีค่าสูงที่สุด แต่การเพิ่มของอุณหภูมิที่บริเวณปลายครีปนี้จะมีค่าน้อยที่สุด ในทำนองเดียวกัน ในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นครีปที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่อุณหภูมิของครีปที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของครีปที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อ การกระจายอุณหภูมิของครีปนั้น จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของครีปแต่ละตำแหน่งก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่ง

ผลลัพธ์จะเหมือนกันทั้งครีบทที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยมและครีบทที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม



2.1 ครีบทตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม

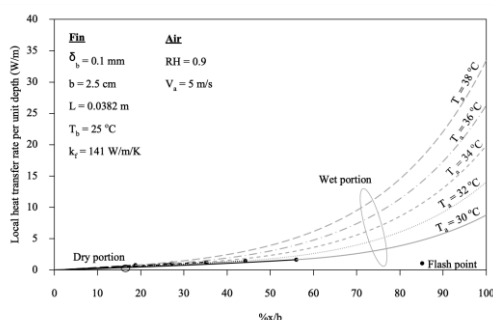


2.2 ครีบทตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม

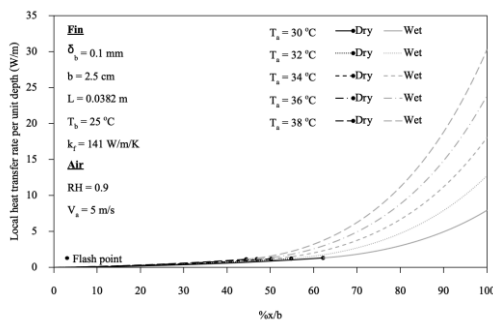
รูปที่ 2 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีบท

นอกจากนี้ ยังมีข้อสังเกตสำหรับความชันของอุณหภูมิที่ฐานครีบท โดยจะพบว่า อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิหรือความชันของอุณหภูมิสำหรับครีบทที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยมจะสูงกว่าความชันของอุณหภูมิสำหรับครีบทที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม โดยความชันที่กล่าวถึงนี้ จะเป็นปริมาณซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการถ่ายโอนความร้อน ดังรูปที่ 3 โดยในรูปที่ 3 นี้ จะแสดงผลกระทบของอุณหภูมิอากาศที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่ โดยจากรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะพบว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ปลายครีบท หรือ $\%x/b = 0$ จะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 และ 2.2 จะพบว่า ความชันของอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้ ก็จะเป็นศูนย์

เช่นกัน ทั้งนี้ เนื่องจากสมการการนำความร้อนนั้น ความชันของอุณหภูมิจะบ่งบอกถึงอัตราการถ่ายโอนความร้อนนั่นเอง และเมื่อ $\%x/b$ เพิ่มขึ้น จะพบว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ฐานครีบท หรือ $\%x/b = 100$ นั่นเอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 และ 2.2 ก็พบว่า ความชันของอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้ จะมีค่าสูงที่สุดนั่นเอง



3.1 ครีบทตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม



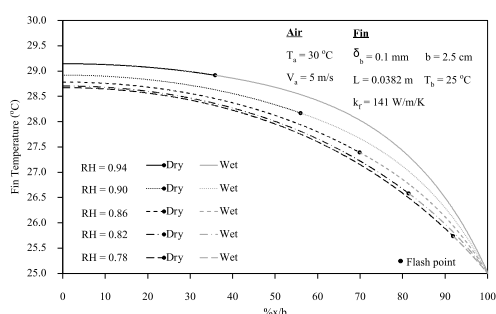
3.2 ครีบทตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม

รูปที่ 3 ผลกระทบของอุณหภูมิอากาศที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่
(Local heat transfer rate)

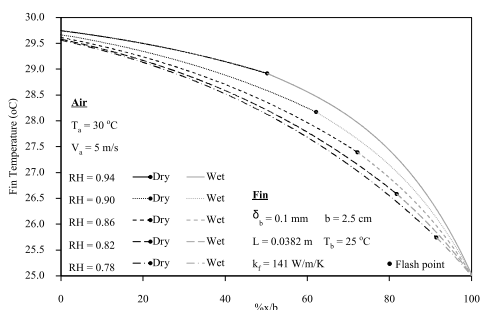
สำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศนั้น จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะพบว่า อุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย โดยครีบทที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยมจะให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าครีบทที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม ทั้งนี้ เนื่องจาก

พื้นที่หน้าตัดในการนำความร้อนมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดนั่นเอง โดยเฉพาะบริเวณปลายครีป ส่วนพื้นที่ผิวสำหรับพาความร้อนมีค่าต่างกันไม่มากนัก

จากรูปที่ 4 แสดงผลกระทบของความชื้นอากาศที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีป โดยจากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่า เมื่อความชื้นอากาศเพิ่มขึ้นอุณหภูมิครีปแต่ละตำแหน่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทว่า x_{dry} กลับมีค่าลดลง



4.1 กรอบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม

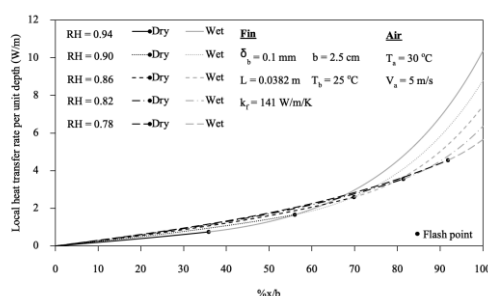


4.2 กรอบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม

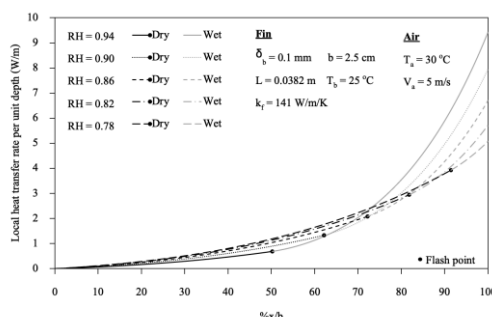
รูปที่ 4 ผลกระทบของความชื้นอากาศที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีป

นอกจากนี้ จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 จะพบว่าความชื้นของอากาศที่เพิ่มขึ้น ยังทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีป หรืออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ตำแหน่ง $\%x/b = 100$ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความชื้นในอากาศมีผลทำให้อุณหภูมิ

และเอนทัลปีของอากาศเพิ่มขึ้น โดยในส่วนของผิวเปียกนั้น ผลต่างของเอนทัลปีระหว่าง อากาศ และอากาศชื้นอ้อมตัวที่อุณหภูมิครีป เป็นปริมาณที่ผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อน ดังนั้น เมื่อความชื้นของอากาศเพิ่มขึ้นจึงทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีป หรืออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อีกทั้ง การเพิ่มความชื้นในอากาศ ยังทำให้บริเวณผิวเปียกมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้นนั่นเอง



5.1 กรอบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม



5.2 กรอบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม

รูปที่ 5 ผลกระทบของความชื้นอากาศที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่

นอกจากนี้ จากรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าในบริเวณปลายครีปนั้น อัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่สำหรับอากาศที่มีความชื้นต่ำ จะมีค่าสูงกว่าเนื่องจาก อุณหภูมิครีปในบริเวณดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศมากกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตาม

เมื่อพิจารณาอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม หรืออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีป ($\%x/b = 100$) จะพบว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมสำหรับอากาศที่มีความชื้นมากกว่า จะมีค่าสูงกว่า

จากผลลัพธ์ที่ได้นี้ ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิและอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่ของครีป จะช่วยเติมเต็มในงานวิจัยของผู้เขียนก่อนนี้ คือ Pirompugd and Wongwiset [9] ได้เป็นอย่างดี

4. สรุปผล

จากการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการกระจายอุณหภูมิและอัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยมและโปรไฟล์สามเหลี่ยมภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 สำหรับครีปทั้ง 2 ชนิดที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วนนั้น อุณหภูมิของครีปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ฐานครีป และจะค่อยๆเพิ่มช้าลงจนถึงบริเวณปลายครีป โดยความชันของอุณหภูมิจะสูงสุดที่ฐานครีป

4.2 สำหรับครีปทั้ง 2 ชนิดที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วนนั้น อัตราการถ่ายโอนความร้อนจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในบริเวณปลายครีป และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในบริเวณถัดไป จนมีค่าสูงสุดที่ฐานครีป

4.3 สำหรับครีปทั้ง 2 ชนิดที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วนนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศจะทำให้อุณหภูมิตามความยาวครีป อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีป และสัดส่วนของผิวเปียก มีค่าเพิ่มขึ้น

4.4 สำหรับครีปทั้ง 2 ชนิดที่อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วนนั้น เมื่ออากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราการถ่าย

โอนความร้อนเฉพาะที่ (local heat transfer) บริเวณปลายครีปจะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม อัตราการถ่ายโอนความร้อนบริเวณฐานครีปหรืออัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดของครีป จะมีค่าเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนลำดับที่ 1 ขอขอบคุณนางสาวชลยา พงพันธ์ และนายวรรณชาติ ตรีภักกิจ ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนในด้านต่างๆ รวมถึงขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับค่าเทอม และศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ และรองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี ที่ได้ให้โอกาสในการเป็นส่วนร่วมในทีมวิจัย และได้ให้การสนับสนุนเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายรายเดือน ผู้เขียนลำดับที่ 2 ขอขอบคุณ สวทช. ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ

6. รายการสัญลักษณ์

b	ความยาวครีป, m
b'_w	ความชันของเอนทัลปีของอากาศอิมเมอร์ที่อุณหภูมิครีป, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$b'_{w,dp}$	ความชันของเอนทัลปีของอากาศอิมเมอร์ที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$C_{p,a}$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $J\ kg^{-1}\ C^{-1}$
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$
$I_{-2/3}$	modified Bessel function solution of the first kind, order -2/3.
$I_{-1/3}$	modified Bessel function solution of the first kind, order -1/3.
I_0	modified Bessel function solution of the first kind, order 0.

$I_{1/3}$	modified Bessel function solution of the first kind, order 1/3.
$I_{2/3}$	modified Bessel function solution of the first kind, order 2/3.
I_1	modified Bessel function solution of the first kind, order 1.
i	เอนทัลปีของอากาศอ้อมตัวที่อุณหภูมิครีป, $J\ kg^{-1}$
i_a	เอนทัลปีของอากาศ, $J\ kg^{-1}$
k_f	ค่าการนำความร้อนของครีป, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
K_0	modified Bessel function solution of the second kind, order 0
K_1	modified Bessel function solution of the second kind, order 1
L	ความลึกของครีป, m
RH	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
T	อุณหภูมิของครีป, $^{\circ}C$
T_a	อุณหภูมิของอากาศ, $^{\circ}C$
x	ระยะจากปลายครีป, m
x_{dry}	ระยะจากปลายครีปถึงบริเวณรอยต่อระหว่างผิวแห้งและผิวเปียก, m
δ_b	ความหนาของครีปที่ตำแหน่งฐานครีป, m
γ	ผลต่างของเอนทัลปีของอากาศ, $J\ kg^{-1}$
γ_{dp}	ผลต่างของเอนทัลปีของอากาศอ้อมตัวที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างและเอนทัลปีของอากาศ, $J\ kg^{-1}$
γ_0	ผลต่างของเอนทัลปีของอากาศอ้อมตัวที่อุณหภูมิฐานครีปและเอนทัลปีของอากาศ, $J\ kg^{-1}$
η	ประสิทธิภาพของครีป
θ	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิครีปและอุณหภูมิอากาศ, $^{\circ}C$
θ_{dp}	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิครีปและอุณหภูมิจุดน้ำค้าง, $^{\circ}C$

7. เอกสารอ้างอิง

1. T.E. Schmidt, "Heat transfer calculations for extended surfaces", Refrigeration Engineering, 49, 351–357, 1949.
2. D.Q. Kern, A.D. Kraus, "Extended surface heat transfer", McGraw-Hill, Inc., New-York, NY, 1972.
3. C. Arslanturk, "A decomposition method for fin efficiency of convective straight fins with temperature-dependent thermal conductivity", International Journal of Heat and Mass Transfer, 32, 831–841, 2005.
4. A.A. Joneidi, D.D. Ganji, M. Babaelahi, "Differential Transformation Method to determine fin efficiency of convective straight fins with temperature dependent thermal conductivity", International Communications in Heat and Mass Transfer, 36, 757–762, 2009.
5. D.B. Kulkarni, M.M. Joglekar, "Residue minimization technique to analyze the efficiency of convective straight fins having temperature-dependent thermal conductivity", Applied Mathematics and Computation, 215, 2184–2191, 2009.
6. J.L. Threlkeld, "Thermal environmental engineering", Prentice-Hall, Inc., New-York, NY, 1970.
7. S.Y. Liang, T.N. Wong, G.K. Nathan, "Comparison of one-dimensional and two-dimensional models for wet-surface fin efficiency of a plate-fin-tube heat exchanger", Applied Thermal Engineering, 20, 941–962, 2000.

8. W. Pirompugd, C.C. Wang, S. Wongwises, “Finite circular fin method for heat and mass transfer characteristics for plain fin-and-tube heat exchangers under fully and partially wet surface conditions”, International Journal Heat Mass Transfer, 50(3–4), 552–565, 2007.
9. W. Pirompugd, S. Wongwises, “Partially wet fin efficiency for the longitudinal fins of rectangular, triangular, concave parabolic, and convex parabolic profiles”, Journal of Franklin Institute, 350, 1424–1442, 2013.
10. W. Pirompugd, S. Wongwises, “Efficiencies for partially wetted spine fins: uniform cross section, conical, concave parabolic, and convex parabolic profiles”, Journal of Heat Transfer, 135(8), Article 081903, 2013.
11. W. Pirompugd, S. Wongwises, “Analytical methods for the efficiency of annular fins with rectangular and hyperbolic profiles under partially wet surface conditions”, Numerical Heat Transfer, Part A: Application, 80(12), 617–634, 2021.
12. P. Nimmy, K.V. Nagaraja, P. Srilatha, K. Karthik, G. Sowmya, R.S.V. Kumar, U. Khan, S.M. Hussain, A.S. Hendy, M.R. Ali, “Implication of radiation on the thermal behavior of a partially wetted dovetail fin using an artificial neural network”, Case Studies in Thermal Engineering, 51, 103552, 2023.
13. U. Milovancevic, S. Genic, B. Jacimovic, M. Otovic, “Wet cooling of air on plate finned tube heat exchangers”, International Journal of Refrigeration, 165, 133–144, 2024.
14. R.J. Myers, “The effect of dehumidification on the air-side heat transfer coefficient for a finned-tube coil”, Master thesis, University of Minnesota, Minneapolis, USA, 1967.

ประวัติผู้ประพันธ์ :

นายทศพล จันทร์ละออ



- จบการศึกษา : ปริญญาตรีจาก
มหาวิทยาลัยบูรพา (วศ.บ.
วิศวกรรมเครื่องกล)
กำลังศึกษาในระดับ : ปริญญาโท
มหาวิทยาลัยบูรพา (วศ.ม.วิศวกรรมเครื่องกล)

รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี



- จบการศึกษา : ปริญญาเอกจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี (วศ.ด.
วิศวกรรมเครื่องกล)

- จบการศึกษา : ปริญญาโทจาก
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (วศ.ม.
วิศวกรรมเครื่องกล)

- จบการศึกษา : ปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี (วศ.บ.วิศวกรรมเครื่องกล)