

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทหมุนควงพุ่งชนบนพื้นผิวเรียบ Heat transfer enhancement of multiple swirling impinging jets on flat surface

นพพล อ่อนจำปี^{1*}, เก่งกล้า กุณรัชช์¹ และ สมิต์ เอี่ยมสะอาด¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่อยู่ 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย
เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

*E-mail: nopphon.oncharmpee@gmail.com, โทรศัพท์ (091) 0929556, โทรสาร (662) 2413029

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและผลกระทบบของกุ่มเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว และศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล (TLC) ที่มีระยะการยิงของกุ่มเจ็ทพุ่งชนกับพื้นผิว (L/D) เท่ากับ 2 4 6 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งในการศึกษาใช้ท่อเจ็ทที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) เท่ากับ 16 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร จำนวน 9 ท่อ บิดเป็นเกลียวที่ความลึกของร่องเกลียว (r/D) เท่ากับ 0.125 และจัดเรียงแบบ 3 x 3 แถว ที่ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท (S/D) คงที่ เท่ากับ 4 และกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 10,000 คงที่ ซึ่งผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของกุ่มเจ็ท ที่ท่อเจ็ทมีความลึกของร่องเกลียว (r/D) เท่ากับ 0.125 จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรยิงของกุ่มเจ็ทแบบท่อเปล่า โดยพิจารณาจากค่า Nusselt Number (Nu) นอกจากนี้ปัจจัยของระยะการยิงระหว่างเจ็ทกุ่มกับพื้นผิว (L/D) เท่ากับ 2 ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Nu) และมีความสม่ำเสมอมากกว่า เมื่อเทียบกับระยะการยิง (L/D) เท่ากับ 4, 6 และ 8 ตามลำดับ

คำหลัก: กุ่มเจ็ทหมุนควงพุ่งชน, การถ่ายเทความร้อน, พฤติกรรมการไหล

Abstract

The paper presents the flow pattern and heat transfer enhancement of the multiple swirling impinging jets on a flat surface received by using Thermo Chromic Liquid Crystal (TLC) sheet. The set of jet nozzles consisted of 9 tube nozzles (3 x 3 arrangement), each tube had an inside diameter (D) of 16 mm and a length of 200 mm. To induce swirl flow, each tube was twisted to form a screw with a depth ratio (r/D) of 0.125. Experiments were performed at constant a jet-to-jet (S/D) of 4, jet-to-plate ratios (L/D) of 2, 4, 6 and 8 and Reynolds number of 10,000. A round tube nozzles were also tested for an assessment. The results show that the twisted tube nozzles (multiple swirling impinging jets) give higher heat transfer (Nusselt numbers) than the smooth tube nozzles (multiple conventional impinging jets). In addition, the jets issuing at the jet-to-plate (L/D) of 2 show the highest heat transfer (Nu) as compared to those issuing at L/D = 4, 6 and 8.

Keywords: Multiple impinging jets, Heat transfer, Flow pattern

1. บทนำ

การศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีใช้เจ็ทพุ่งชนเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ถูกนำมาศึกษา และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีเจ็ทพุ่งชนนั้น นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การนำไปใช้ในการระบายความร้อนให้กับใบพัดแก๊ส

เทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงและเหมาะกับการระบายความร้อนแบบรวดเร็วและสามารถนำมาใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนแบบที่มีลักษณะเฉพาะจุดหรือแบบกว้างได้ โดยการยิงเจ็ทไปยังพื้นผิวตกกระทบบที่ต้องการระบายความร้อนในลักษณะต่างๆ ซึ่งการถ่ายเทความร้อน

บริเวณตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงนั้น จะมีค่าสูงกว่า บริเวณโดยรอบๆ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผิวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการศึกษา พัฒนาปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนความร้อนบนพื้นผิวตกรกระทบจากการยิงของเจ็ทกลุ่มให้มีความสม่ำเสมอของการระบายความร้อนบนพื้นผิว โดยการสร้างการหมุนควงของอากาศภายในท่อเจ็ทก่อนทำการยิงไปยังพื้นผิวที่มีระยะการยิงและการจัดเรียงของท่อเจ็ทที่มีความแตกต่างกัน

ในการศึกษาการยิงเจ็ทกลุ่มไปยังพื้นผิวตกรกระทบที่มีระยะการยิงที่ต่างกัน จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเจ็ทในขณะที่พุ่งชนพื้นผิวและลักษณะของการถ่ายเทความร้อนแตกต่างกันออกไปตามระยะการยิง นอกจากนี้โมเมนตัมและระดับความปั่นป่วนภายในท่อเจ็ทก่อนยิงไปยังพื้นผิวตกรกระทบ ซึ่งจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยเฉพาะการยิงแบบเจ็ทกลุ่ม โครงสร้างการไหลจะมีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีความซับซ้อนมากกว่าเจ็ทเดี่ยว นอกจากนี้ปัจจัยของระยะการพุ่งชนของเจ็ทกับพื้นผิวและระดับความปั่นป่วนภายในท่อเจ็ทแล้ว ยังมีปัจจัยของการจัดเรียงของเจ็ทและระยะห่างระหว่างเจ็ทที่ส่งผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทน้อยเกินไปหรือไม่เหมาะสม จะเกิดการผสมกันระหว่างของไหลในขณะที่พุ่งออกของเจ็ทที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนที่พื้นผิวแล้วยังเกิดปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนัง (Wall jet) ที่บริเวณที่อยู่ติดกัน ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังที่บริเวณนี้มีความซับซ้อนมากขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและทดลอง ถึงตัวแปรต่างๆ ที่สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวให้สูงขึ้นและมีความสม่ำเสมอมากที่สุด

ในปี 2017 Kumar และคณะ [1] ได้ทำการศึกษารายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจากการยิงด้วยเจ็ทที่ใส่แผ่นบิด เพื่อสร้างการหมุนควงของอากาศภายในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ยาว 650 มิลลิเมตร โดยแผ่นบิดที่ใช้ในการทดสอบมีค่าอัตราการบิด (Twist ratio) เท่ากับ 2 3.2 4.5 และ 7.5 ตามลำดับ และค่าการระบิดการหมุนควง (Swirl number) เท่ากับ 0.21 0.35 0.49 และ 0.79 ตามลำดับ โดยในการทดลองกำหนดระยะการยิงระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวตกรกระทบ (z/d) อยู่ในช่วง 1 ถึง 4 ซึ่งผลการทดลองพบว่าที่

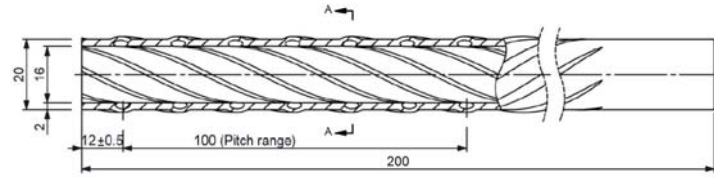
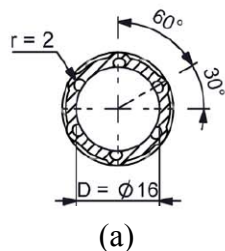
อัตราส่วนการบิด (Twist ratio) เท่ากับ 4.5 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและที่ระยะการยิงระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวตกรกระทบ (z/d) เท่ากับ 1 จะเป็นระยะการยิงของเจ็ทที่มีความเหมาะสมมากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะอื่นๆ และ ในปี ค.ศ. 2015 Eiamsa-ard และคณะ [2] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากการยิงของท่อเจ็ท โดยใส่แผ่นบิดเข้าไปในท่อเจ็ทที่มีความหนาเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร กว้าง 9 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ใช้ค่าอัตราส่วนการบิด (y/W) เท่ากับ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ และจัดรูปแบบการจัดวางของแผ่นบิดที่สอดใส่ในท่อเจ็ทซึ่งมีรูปแบบที่ต่างกัน ได้แก่ ใส่แผ่นบิดคู่ที่บิดในทิศทางเดียวกัน ทิศทางตรงข้ามกัน และการใส่แผ่นกัน (Baffle) สำหรับในการสร้างการหมุนควงของเจ็ทก่อนยิงไปยังพื้นผิวตกรกระทบ เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยกำหนดระยะของเจ็ทกับพื้นผิวตกรกระทบ (L/D) อยู่ในช่วง 1 ถึง 8 จากการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อเจ็ทที่ใส่แผ่นบิดและแผ่นกันจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุด โดยค่าการถ่ายเทความร้อนจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนการบิด (y/W) อีกด้วย จากนั้น Wannassi และ Monnoyer [3] ได้ทำการศึกษารายการผสมผสานระหว่างการไหลแบบหมุนควงของท่อเจ็ทที่มีการจัดเรียงกันเป็นแถว เพื่อพัฒนาและปรับปรุงการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) และทำการทดลอง ด้วยการยิงของเจ็ทกลุ่ม (Multiple impinging jets) ที่มีการจัดเรียงเจ็ทแบบ 2×2 แถว ระยะห่างระหว่างหัวเจ็ท (S/D) เท่ากับ 5 และระยะห่างระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวตกรกระทบ (H/D) เท่ากับ 4 โดยเจ็ทที่ใช้ในการทดลองจะใส่ตัวสร้างการหมุนควงแบบใบพัด (Blade type swirl generator) ที่มีลักษณะการทำมุมของใบพัดเท่ากับ 20° 30° และ 45° ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองด้านการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่าลักษณะของใบพัดที่ทำมุม 45° จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุม 30° และ 20° ตามลำดับ นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยการแสดงผลของภาพจากการยิงของเจ็ทกลุ่มด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน โดยลักษณะการกระจายตัวบนฟิล์มน้ำมันจากการยิงเจ็ทด้วยใบพัดที่ทำมุม 45° มีความสม่ำเสมอมากที่สุด และในปี ค.ศ. 2012 บุรินทร์ แก้วไกรทอง และคณะ [4] ได้ศึกษา

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยมีการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควงที่ตรงบริเวณปากทางออกของท่อเจ็ท ที่มีลักษณะเป็นแบบปีกสามเหลี่ยมจำนวน 2 และ 4 ตำแหน่ง โดยที่ให้มีมุมปะทะกับของไหลขณะออกจากท่อเจ็ทเท่ากับ 45° และ 60° นอกจากนี้ ได้กำหนดระยะระหว่างเจ็ทกับพื้นผิวดกกระทบเท่ากับ $(H) = D, 2D, 4D, 6D$ และ $8D$ (เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเจ็ท) ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า โดยเงื่อนไขการติดตั้งตัวสร้างการหมุนควง 2 ตำแหน่ง ที่มีมุมปะทะเท่ากับ 45° และระยะการยิงของเจ็ทถึงพื้นผิวดกกระทบเท่ากับ $8D$ ให้ค่า Nusselt number (Nu) สูงสุด ต่อมา Nuntadusit และคณะ [5] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ใส่แผ่นปิดให้เกิดการหมุนควงภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) เท่ากับ 16.5 มิลลิเมตร ก่อนยังไปยังพื้นผิวดกกระทบที่ $L = 4D$ โดยในการทดลองใช้แผ่นปิดที่อัตราส่วนการปิด (y/W) เท่ากับ 1.52 1.82 2.27 และ 3.64 ตามลำดับ โดยมีค่าระดับการหมุนควง $Sw = 0.40$ 0.60 0.78 และ 0.94 ซึ่งการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนการปิด $y/W = 3.64$ และค่าระดับการหมุนควงเท่ากับ 0.4 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

ในการทดลองได้ใช้ท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) เท่ากับ 16 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร จำนวน 9 ท่อ โดยจัดเรียงแบบ 3×3 แถว ปิดเป็นร่องเกลียวภายในท่อเจ็ทที่มีความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ ดังแสดงในรูปที่ 1 กำหนดให้ระยะห่างจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวที่พุ่งชน $L/D = 2$ 4 6 และ 8 ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท $S/D = 4$ และกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 10,000 คงที่



(b)

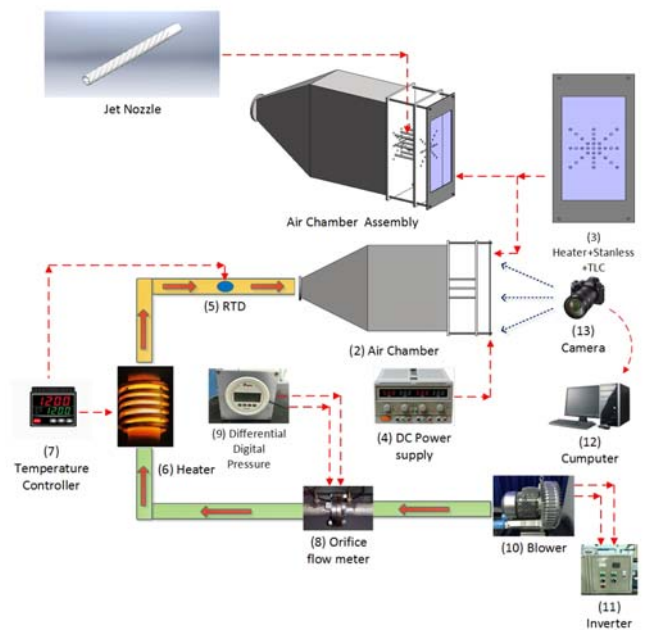


(c)



(d)

รูปที่ 1 รายละเอียดท่อเจ็ทปิดเกลียวที่ระยะความลึก $r/D=0.125$



รูปที่ 2 ไดอะแกรมชุดทดลอง

จากรูปที่ 2 แสดงไดอะแกรมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งใช้อากาศภายในห้องทดลองดูดผ่านเครื่องกำเนิดลม (Blower) ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องควบคุมรอบ (Inverter) เพื่อที่สามารถปรับความเร็วอากาศให้ได้ค่าเรย์โนลด์ส์ (Re) ที่ใช้ในการ

ทดลอง หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งต้องควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ในขณะที่ทำการทดลองด้วยชุดฮีตเตอร์ ก่อนส่งอากาศเข้าไปยังชุดกล่องลม (Air Chamber) และส่งผ่านไปยังกลุ่มท่อเจ็ทเพื่อยังไปยังพื้นผิวที่ให้ค่าความร้อนคงที่ผ่านแผ่นสแตนเลสและติดตั้งแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) เพื่อสังเกตลักษณะของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวผ่านสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) และบันทึกภาพ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์

2.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทกลุ่มที่สร้างการหมุนควงของอากาศก่อนยิงไปยังบนพื้นผิวส่งผลให้เกิดกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมบนพื้นผิวตกกระทบ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงเฉดสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) จะถูกวิเคราะห์รายละเอียดของภาพในแต่ละจุดที่ปรากฏเพื่อนำไปคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เกิดจากการทดลอง โดยแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) ที่ใช้ในการทดลองมีช่วงอุณหภูมิทำงานอยู่ที่ 25 – 30 องศาเซลเซียส ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร

ในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนหลังจากการพุ่งชนของเจ็ทกลุ่มบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) ที่แสดงผลเป็นแถบสีในแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งเส้นแถบสีที่เกิดขึ้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการนำรูปภาพที่บันทึกจากการทดลองมาซ้อนกันบนคอมพิวเตอร์โดยวิธี Image Processing ซึ่งได้ทำให้ได้ข้อมูลการกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว และสามารถนำมาคำนวณค่า Nusselt number (Nu) ได้ ดังแสดงในสมการที่ (1) – (5)

สมการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h)

$$h = \frac{q_{input} - q_{losses}}{T_{LC} - T_{jet}} \quad (1)$$

เมื่อ q_{input} คือ อัตราการเกิดความร้อนบนแผ่นสแตนเลส

q_{losses} คือ อัตราความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบธรรมชาติด้านหลังแผ่นสแตนเลสที่ติดแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) (W/m^2)

T_{LC} คือ อุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนบนแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC)

T_{jet} คือ อุณหภูมิขณะบริเวณปากทางออกของเจ็ท

สมการคำนวณหาอัตราการความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นสแตนเลสที่ติดแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) จะประกอบด้วยความร้อนที่สูญเสียจากการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่สูญเสียจากการนำความร้อน มีสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียความร้อนในรูปแบบอื่น จึงไม่นำมาพิจารณาและคำนวณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงในสมการ ดังนี้

$$q_{loss} = q_{loss,conv} + q_{loss,rad} \quad (2)$$

โดย สมการความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อน

$$q_{loss,conv} = h_c (\bar{T}_w - T_s) \quad (3)$$

และ สมการความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี

$$q_{loss,rad} = \sigma \epsilon_{TLC} (\bar{T}_w^4 - T_s^4) \quad (4)$$

เมื่อ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติของแผ่นเรียบในแนวระนาบ

\bar{T}_w คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบนแผ่นสแตนเลส

T_s คือ ค่าอุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzman) มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$

ϵ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (TLC) เท่ากับ 0.9

สมการคำนวณหาค่า Nusselt number (Nu)

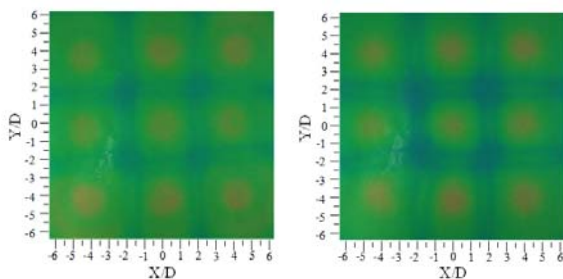
$$Nu = \frac{h.D}{k} \quad (5)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

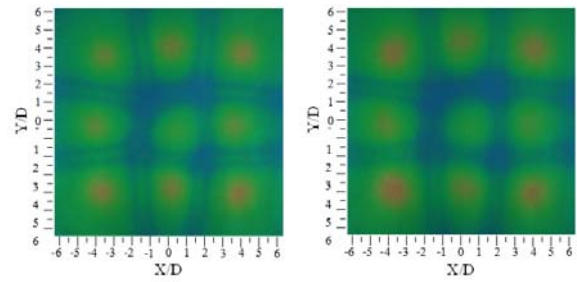
3. ผลการทดลอง

จากผลการทดลองการยิงของกลุ่มเจ็ทด้วยท่อเจ็ทแบบท่อเปล่าและที่ปิดเป็นเกลียวมีความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากผลกระทบของระยะพุ่งชน (L/D) ที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละการทดลองมีเงื่อนไขกำหนดให้ค่าอุณหภูมิขณะบริเวณปากทางออกของเจ็ท (T_{jet}) = 27 °C ค่าเรย์โนลด์ส์คงที่ 10,000 และฟลักส์ความร้อนบนพื้นผิววงที่ โดยสีบนแผ่นเทอร์โมโครมิคควิตคริสตอล (TLC) จะแสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวจะมีอุณหภูมิต่ำและมีการถ่ายเทความร้อนที่สูง ส่วนบริเวณห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว อุณหภูมิจะสูงขึ้นและการถ่ายเทความร้อนจะลดลง โดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ตรงกึ่งกลาง พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง เนื่องจากการไหลที่อยู่ตรงกลางจะถูกจำกัดโดยเจ็ทที่อยู่รอบๆ ทั้ง 4 ด้าน แต่เจ็ทบริเวณโดยรอบทั้งสี่ด้านจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูง (Nu) ซึ่งสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของ Nusselt number ในรูปที่ 4 และรูปที่ 6 ที่แสดงการยิงของกลุ่มเจ็ทแบบท่อเปล่าและแบบท่อปิดเกลียวที่ค่าความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ ตามลำดับ นอกจากนี้ การยิงของกลุ่มเจ็ทของท่อแบบปิดเกลียวที่ค่าความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ สามารถช่วยให้การกระจายตัวของค่า Nusselt number ที่ตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวขยายเป็นบริเวณกว้างกว่าเจ็ทแบบท่อเปล่า โดยสังเกตได้จากลักษณะจุดสีแดงในรูปที่ 4 และ 6



(a) $L/D = 2$

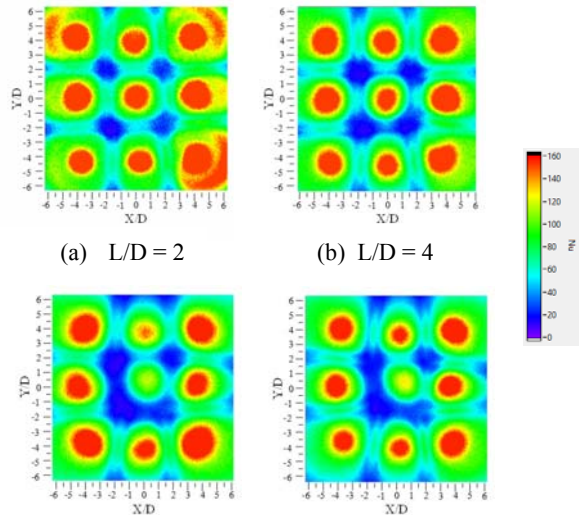
(b) $L/D = 4$



(c) $L/D = 6$

(d) $L/D = 8$

รูปที่ 3 แสดงภาพการกระจายของสีบนแผ่น TLC ของกลุ่มเจ็ทแบบท่อเปล่าที่ค่า $Re = 10,000$ และ $S/D = 4$ คงที่



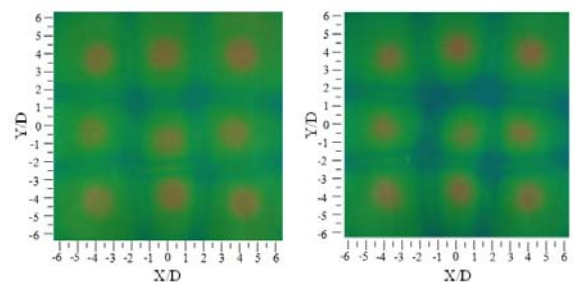
(a) $L/D = 2$

(b) $L/D = 4$

(c) $L/D = 6$

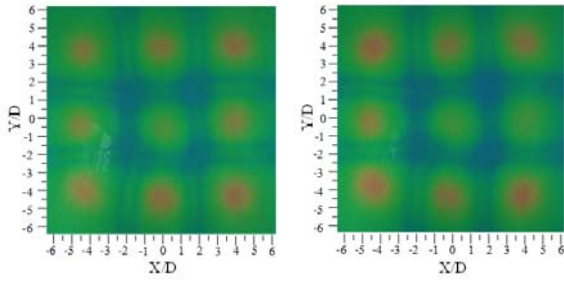
(d) $L/D = 8$

รูปที่ 4 แสดงภาพการกระจายตัวของค่า Nu บนพื้นผิวพุ่งชนของกลุ่มท่อเจ็ทแบบท่อเปล่าที่ค่า $Re = 10,000$ และ $S/D = 4$ คงที่



(b) $L/D = 2$

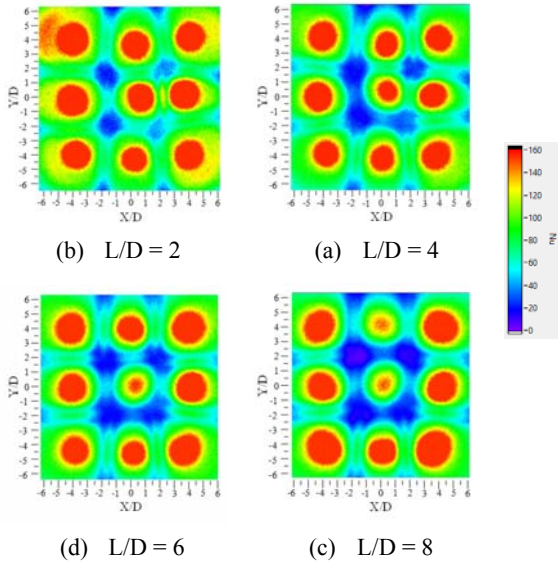
(a) $L/D = 4$



(d) $L/D = 6$

(c) $L/D = 8$

รูปที่ 5 แสดงภาพการกระจายของสีบนแผ่น TLC ของกลุ่มเจ็ทแบบท่อปิดเกลียวที่ค่าความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ ที่ค่า $Re = 10,000$ และ $S/D = 4$ คงที่



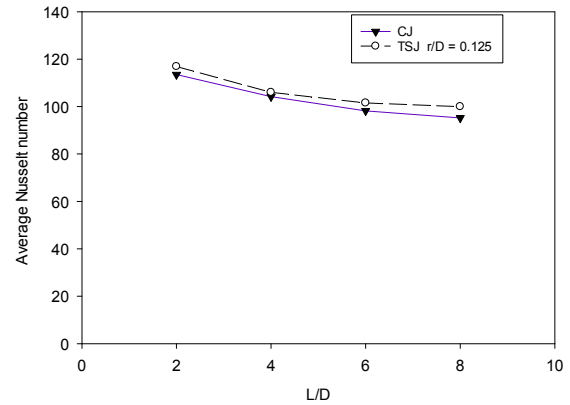
(b) $L/D = 2$

(a) $L/D = 4$

(d) $L/D = 6$

(c) $L/D = 8$

รูปที่ 6 แสดงภาพการกระจายตัวของค่า Nu บนพื้นผิวฟุ้งชนของกลุ่มเจ็ทแบบท่อปิดเกลียวที่ค่าความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ ที่ค่า $Re = 10,000$ และ $S/D = 4$ คงที่



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่า Nu บนพื้นผิวฟุ้งชนของกลุ่มเจ็ทแบบท่อเปล่า (CJ) และท่อปิดเกลียว (TSJ) ค่าความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ ที่ค่า $Re = 10,000$ และ $S/D = 4$ คงที่

จากผลของระยะการยิงของเจ็ททั้งสองแบบส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยที่ระยะการยิง $L/D = 2$ จะให้ค่า Nusselt number สูงสุดและค่อนข้างสม่ำเสมอ และจะลดลงเมื่อระยะการยิงเพิ่มมากขึ้น ($L/D = 4, 6$ และ 8 ตามลำดับ) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 7 ที่แสดงการเปรียบเทียบของค่า Nusselt number ของเจ็ทแบบท่อเปล่าและท่อปิดเกลียวที่ค่าความลึกของร่องเกลียว $r/D = 0.125$ เนื่องจากเมื่อระยะการยิงของเจ็ทมากขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วของเจ็ทลดลงเกิดการสูญเสียกับภายนอกโดยเฉพาะที่ระยะ $L/D = 8$ ซึ่งเป็นระยะการยิงที่ไกลที่สุด

4. สรุปผลการทดลอง

(1) ที่ระยะการฟุ้งชนมีค่าน้อยที่ระยะการยิง $L/D = 2$ การใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงฟุ้งชน สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำฟุ้งชนได้และยังสามารถช่วยลดพื้นที่บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำระหว่างบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนอีกด้วย แต่เมื่อระยะการฟุ้งชน (L/D) เพิ่มมากขึ้นลักษณะการการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงและมีความทับซ้อนไม่เป็นระเบียบเนื่องจากเกิดจากการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงที่อยู่ติดกันก่อนการฟุ้งชน

(2) ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (Nu) ที่ระยะการยิงของเจ็ทกลุ่ม $L/D = 2$ จะมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีที่ $L/D = 4$ 6 และ 8 ตามลำดับ

6. สัญลักษณ์และอักษรย่อ

6.1 สัญลักษณ์ทั่วไป

A	พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน (m^2)
$C_{p,air}$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg.K)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($w/m^2.K$)
I	กระแสไฟฟ้า (A)
k	สภาพการนำความร้อน (W/m.K)
L	ความยาวท่อทดสอบ (m)
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
Nu	เลขนัสเซลท์
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (W)
\dot{q}	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ (W/m^2)
Re	เลขเรย์โนลด์ส์
t	ความหนาท่อทดสอบ (m)
\bar{T}	อุณหภูมิเฉลี่ย (K)
σ	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stafan-Boltzman) มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} $W/m^2.K^4$
ϵ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

6.2 สัญลักษณ์ตัวห้อย

Input	ความร้อนที่ให้กับระบบ
losses	ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้น
conv	การพาความร้อน
rad	การแผ่รังสี
LC	แผ่นเทอร์โมโครมิคควิดคริสตอล (TLC)
jet	ปากทางออกของเจ็ท
s	บรรยากาศโดยรอบ
w	แผ่นสแตนเลส

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Saroj Suresh Kumar, Vijaykumar Hindasageri and S.V. Prabhu (2017). Local heat transfer distribution on a flat plate impinged by a

swirling jet generated by a twisted tape, International Journal of Thermal Sciences 111, pp. 351 - 368

[2] S.Eiamsa-ard K.Nanan and K. Wongcharee (2015). Heat transfer visualization of co/counterdual swirling impinging jets by thermochromic liquid crystal method, International Journal of Heat and Mass Transfer 86, pp. 600 – 621.

[3] M. Wannassi and F. Monnoyer (2015). Fluid flow and convective heat transfer of combined swirling and straight impinging jet arrays, Applied Thermal Engineering 78, pp. 62 – 73

[4] บุรินทร์ แก้วไกรกรอง, มักรัตน์ แวหะยี่, ธีระยุทธ หลีวิจิตร และ ชยุต นันทดุสิต (2555). ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ลำเจ็ทพุ่งชน กรณีติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนวนที่ปากทางออกเจ็ท, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, ตุลาคม 2555

[5] C. Nuntadusit, M. Wae – hayee, A. Bunyajitradulya and S. Eiamsa-ard (2012). Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jets with twisted – tape swirl generators, International Communications in Heat and Mass Transfer 39, pp. 102 - 107