

การศึกษาเชิงทดลองการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน
โดยใช้แผ่นผลึกเหลวเทอร์โมโครมิกควบคู่กับเทคนิคการประมวลผลภาพ

**Experimental investigation on heat transfer of
impingement jet using a thermochromic liquid crystal
sheet coupled with an image processing technical**

เก่งกล้า กุณรักษ์, สมิต์ เอี่ยมสอาด

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ. กรุงเทพฯ 10530

E-mail: kengkla.k@hotmail.com

ขวัญชัย หนาแน่น

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จ. เพชรบุรี 76000

และ โอนทัย สุขแสงพนมรุ้ง

กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ. นครนายก 26001

Manuscript received June 23, 2021

Revised June 29, 2021

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อแสดงผลกระทบของตัวแปรหลัก คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและแผ่นผิวเรียบ ($L/D = 2.0, 4.0, 6.0$ และ 8.0) และเลขเรย์โนลด์ส ($Re = 5000, 10000, 15000$ และ 20000) ต่อคุณลักษณะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน โดยศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนโดยใช้แผ่นผลึกเหลวเทอร์โมโครมิก (TLC) ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาพ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงสภาวะที่ทำการศึกษานั้น การเปลี่ยนแปลงสภาวะจาก $L/D = 2.0$ และ $Re = 15000$ เป็น $L/D = 2.0$ และ $Re = 20000$ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดโดยเพิ่มขึ้นประมาณ 106.5%

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อน, เทคนิคการประมวลผลภาพ, เจ็ทพุ่งชน, แผ่นผลึกเหลวเทอร์โมโครมิก

ABSTRACT

The article aimed to clarify the influence of major parameters which are jet-to-plate spacings ($L/D = 2.0, 4.0, 6.0$ and 8.0) and jet Reynolds numbers ($Re = 5000, 10000, 15000$ and 20000) on heat transfer enhancement characteristics of impinging jet. In the experiments, the heat transfer behaviors were visualized using a thermochromic liquid crystal (TLC) sheet coupled with an image processing technical. The obtained experimental results revealed that the change of operating condition from $L/D = 2.0$ and $Re = 15000$ to $L/D = 2.0$ and $Re = 20000$, resulted in the maximum heat transfer enhancement by around 106.5%.

Keywords: Heat transfer, image processing technical, impinging jet, thermochromic liquid crystal

1. บทนำ

การใช้เจ็ทพ่นพ่นผิวได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น [1] – [3] เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพ่นโดยตรง และเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือ ให้อัตราส่วนระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนต่อมวลของไหลที่สูง ดังนั้นจึงสามารถประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพ่นโดยตรงเท่านั้นแต่บริเวณรอบๆการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพ่นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเจ็ทอิสระก่อนพ่นผนังและระยะพ่นของเจ็ท ในบทความนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของเจ็ทอิสระ โครงสร้างของเจ็ทพ่น เจ็ทแบบไม่จำกัดและแบบจำกัด เจ็ทกลุ่ม และเจ็ทหมุนควง ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพ่น

ปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเจ็ทพ่นต่อการถ่ายเทความร้อน ดังเช่น Brignoni และ Garimella [4] ศึกษาอิทธิพลของหัวฉีดที่มีการลบมุมส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนทดลองเจ็ทอากาศพ่นด้วยหัวฉีด 3 ลักษณะ หัวฉีดขอบคม หัวฉีดลบมุม 60° และหัวฉีดลบมุม 41° ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส 5000 ถึง 20,000 และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น $L/D=1$ ถึง 4 ผลการทดลองพบว่าหัวฉีดที่มีการลบมุมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดขอบคม และการถ่ายเทความร้อนสูงสุดสำหรับหัวฉีดลบมุม 60° และยังพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส Lee และ Lee [5] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะรูปร่างหัวฉีดส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบริเวณศูนย์กลาง การทดลองใช้หัวฉีด 3 ลักษณะ หัวฉีดออร์ฟิซขอบคม หัวฉีดออร์ฟิซขอบมาตรฐาน และหัวฉีดออร์ฟิซขอบแหลมคม ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส 5000 ถึง 30,000 และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น $L/D=2, 4, 6$ และ 10 ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าคุณลักษณะรูปร่างหัวฉีดส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบริเวณศูนย์กลาง หัวฉีดออร์ฟิซขอบคมช่วยให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อน

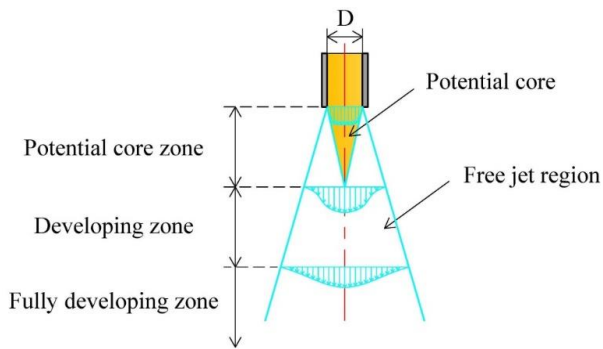
ร้อนสูงสุด สูงกว่าหัวฉีดออร์ฟิซขอบมาตรฐาน และหัวฉีดออร์ฟิซขอบแหลมคม ตามลำดับ และการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส และการลดระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น Hofmann และคณะ [6] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและโครงสร้างการไหลของของไหล ได้ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส 14,000 ถึง 150,000 และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น (L/D) เท่ากับ 1 ถึง 10 การทดลองใช้กล้องอินฟราเรดวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส และมีค่าสูงที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น (L/D) น้อย ยังพบว่าการทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่นน้อยจะปรากฏการถ่ายเทความร้อนสูงช่วงที่ส่องระยะห่างจากจุดศูนย์กลางตามแนวรัศมี Attalla และ Salem [7] ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของหัวฉีดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน หัวฉีดแบบ chamfer แต่ละหัวมีมุมเอียงแชมเฟอร์ 60° และมีระยะ chamfer 3 ค่า คือ 1 mm, 2.3 mm และ 3.65 mm เปรียบเทียบกับหัวฉีดแบบ square ทดลองที่เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วง 6000 และ 40,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น 1 ถึง 6 ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส และการลดลงของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น และยังพบว่าหัวฉีดแบบ square ให้ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยสูงสุด

งานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทอากาศพ่น หัวฉีดหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=20$ มม. ดำเนินการทดลองที่อัตราการไหลในรูปของเลขเรย์โนลด์ส $Re=5000, 10,000, 15,000$ และ $20,000$ และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพ่น $L/D=2, 4, 6$ และ 8 โดยได้ทำการวัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพ่นโดยใช้แผ่นผลึกเหลวเทอร์โมโครมิกควบคู่กับเทคนิคการประมวลผลภาพ

2. โครงสร้างเจ็ทพ่น

2.1 โครงสร้างของเจ็ทอิสระ

เจ็ทอิสระ (Free jet) คือของไหลที่ไหลด้วยความเร็วออกจากปลายหัวฉีดไปสู่ของไหลหยุดนิ่งภายนอกดังรูปที่ 1 บริเวณรอบนอกของเจ็ทที่พุ่งออกมาถูกดูดให้ความเร็วลดลง ในขณะที่บริเวณแกนกลางยังคงรักษาความเร็วไว้เกิดแรงดูดจากด้านนอกสู่บริเวณแกนกลางจนกระทั่งเจ็ทอิสระที่พุ่งออกมาหยุดนิ่ง และได้มีการแบ่งโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระดังนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างของเจ็ทอิสระ

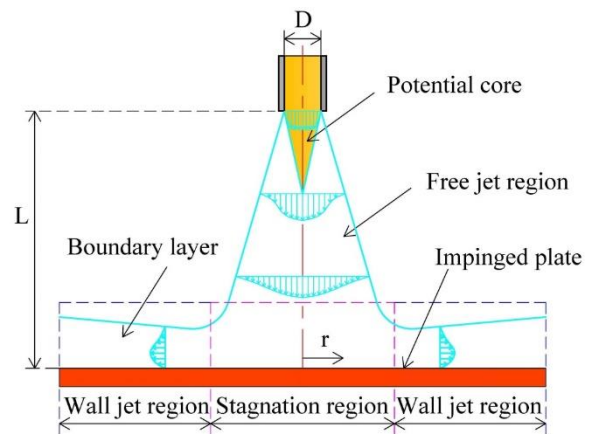
- โซนแกนโพเทนเชียล (Potential core zone) เป็นโซนที่ของไหลพุ่งออกจากหัวฉีดที่โปรไฟล์ความเร็วและขนาดหน้าตัดเคียงกับในหัวฉีด เมื่อของไหลพุ่งออกมาจะมีระยะทางออกหัวฉีดเพิ่มขึ้นจะเริ่มเกิดแรงดูดเนื่องจากของไหลหยุดนิ่งโดยรอบ แรงดูดเกิดขึ้นบริเวณรอบนอกของของไหลจนถึงบริเวณแกนกลางทำให้โปรไฟล์ความเร็วและขนาดหน้าตัดของแกนโพเทนเชียลมีขนาดลดลงจนกระทั่งไม่มีแกนโพเทนเชียล

- โซนการไหลพัฒนา (Developing zone) เป็นโซนที่เกิดขึ้นหลังจากโซนแกนโพเทนเชียลสิ้นสุดลง โซนนี้หน้าตัดของเจ็ทจะขยายเพิ่มขึ้นและความเร็วของไหลบริเวณแกนกลางจะลดลงจนเริ่มใกล้เคียงกับความเร็วบริเวณรอบนอก

- โซนการไหลพัฒนาเต็มที่ (Fully developing zone) เป็นโซนที่เกิดขึ้นหลังจากโซนการไหลพัฒนา โซนนี้ของไหลเกิดการไหลแบบเปลี่ยนแปลงความเร็วพัฒนาเต็มที่แล้ว จะเกิดการไหลปั่นป่วนมากขึ้น

2.2 โครงสร้างของเจ็ทแบบดั้งเดิม

เจ็ทแบบดั้งเดิม (Conventional Impinging jet) คือของไหลที่ถูกบังคับให้ไหลออกจากหัวฉีดพุ่งไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยทิศทางตั้งฉากกันดังรูปที่ 2 โครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนโซนก่อนถึงพื้นผิวจะเหมือนกับเจ็ทอิสระ แต่หลังจากพุ่งชนพื้นผิวแล้วจะกระจายตัวและไหลไปตามพื้นผิว และได้มีการแบ่งโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนดังนี้



รูปที่ 2 โครงสร้างของเจ็ทพุ่งชน

- บริเวณเจ็ทอิสระ (Free jet region) เป็นบริเวณที่ของไหลพุ่งออกมาจากหัวฉีดก่อนถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ประกอบด้วย โซนแกนโพเทนเชียล (Potential core zone) โซนการไหลพัฒนา (Developing zone) และโซนการไหลพัฒนาเต็มที่ (Fully developing zone) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากหัวฉีดถึงพื้นผิว (L) หากมีระยะห่างน้อยจะมีแกนโพเทนเชียล หากเพิ่มระยะมากขึ้นจะเกิดโซนการไหลพัฒนาและโซนการไหลพัฒนาเต็มที่ตามลำดับ

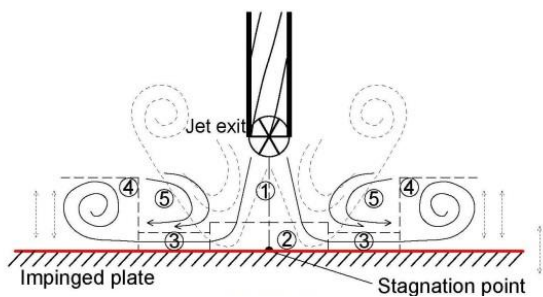
- บริเวณที่ของไหลพุ่งชน (Stagnation region) เป็นบริเวณที่ของไหลพุ่งชนพื้นผิว ของไหลพุ่งมีความเร็วลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่จุดศูนย์กลางของเจ็ท จากนั้นของไหลเกิดการเปลี่ยนทิศทางจากการไหลตั้งฉากเป็นไหลไปตามพื้นผิว

- บริเวณเจ็ทไหลไปตามพื้นผิว (Wall jet region) หรือบริเวณเจ็ทผนังเป็นบริเวณที่เกิดขึ้นถัดจากบริเวณที่ของไหลพุ่งชนของไหลจะไหลไปตามพื้นผิว และความเร็วของการไหลจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการดูดของของไหลเหนือเจ็ท และยังทำให้ชั้นขอบเขตการไหล (Boundary layer) มีความหนาเพิ่มขึ้นด้วย

2.3 โครงสร้างเจ็ทของหมุนควงพุ่งชน

เจ็ทหมุนควงพุ่งชน (Swirling impinging jets) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เจ็ทอากาศที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดจะเกิดการไหลแบบหมุนควงมีความแตกต่างกับเจ็ทแบบดั้งเดิม (Conventional impinging jet) คือเจ็ท

แบบดั้งเดิมจะมีเพียงแค่ความเร็วตามแนวแกนแต่เจ็ทหมุนควงจะมีทั้งความเร็วตามแนวแกนและความเร็วสัมผัส ของไหลเกิดการไหลปั่นป่วนจากในหัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง เจ็ทหมุนควงพุ่งชนที่พื้นผิวจะมีบริเวณที่ของไหลพุ่งชนกว้างกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิม และมีความปั่นป่วนบริเวณเจ็ทไหลไปตามพื้นผิว (Wall jet region) มากกว่า ดังรูปที่ 3 ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนดีขึ้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ ของไหลที่ไหลออกจากปลายหัวฉีดลักษณะหมุนควงด้วยความเร็ว และเจ็ทหมุนควงมีความเร็วสูงสุดที่ด้านนอกสุดของเจ็ทอิสระเกิดการขยายหน้าตัดของลำเจ็ทที่กว้างกว่าและทำให้มีพื้นที่พุ่งชนมากกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิมก่อนจะพุ่งชนพื้นผิวทิศทางด้านข้าง จากนั้นของไหลที่พุ่งชนมีความเร็วลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่จุดกึ่งกลางของเจ็ท และของไหลเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลจากตั้งฉากเป็นการไหลตามพื้นผิวหรือเจ็ทผนังเป็นบริเวณที่เกิดขึ้นถัดจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งของไหลจะไหลไปตามพื้นผิวและเกิดชั้นของเขตการไหล (Boundary layer) มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อระยะจากจุดศูนย์กลาง (Stagnation point) เพิ่มขึ้น จากนั้นความเร็วของของไหลจะเริ่มลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเข้าไปผสม (entrainment) ของอากาศโดยรอบ และก่อให้เกิดการหมุนวน (vortices) นอกจากนี้ในการออกแบบแผ่นปิดเพื่อสร้างการไหลหมุนควงครั้งนี้ยังมีแผ่นปิดแบบกลวงตรงกลางที่ติดตั้งในหัวฉีดกลมและติดตั้งในหัวฉีดหน้าตัดแบบสามเหลี่ยม เพื่อสร้างการไหลหมุนควงบริเวณรอบนอกของลำเจ็ท และแผ่นปิดลักษณะนี้ได้ออกแบบเพื่อแก้ปัญหาการตัดกันของแผ่นปิดบริเวณแกนกลางของเจ็ท

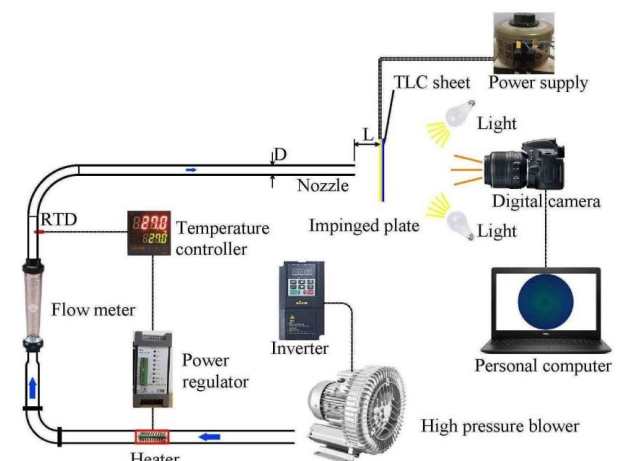


รูปที่ 3 โครงสร้างของเจ็ทหมุนควงพุ่งชน

3. อุปกรณ์ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทพุ่งชน ดังแสดงในรูปที่ 4 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ (1) พัดลมอัดอากาศแรงดันสูง (2) อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์พัดลมอัดอากาศ (3) ชุดควบคุมอุณหภูมิเจ็ทอากาศที่ทางเข้าชุดทดลอง (4) เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศแบบโรตาริเตอร์ (5) หัวฉีดเจ็ทอากาศ (6) ชุดทดลองหรือแผ่นที่เจ็ทพุ่งชน (7) หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุน (8) กล้องดิจิทัล และ (9) คอมพิวเตอร์ ในการทดลองรูปแบบนี้อุปกรณ์ที่สำคัญคือ แผ่นที่เจ็ทพุ่งชน (Impinging plate) ประกอบด้วยแผ่นฮีตเตอร์ได้ถูกติดไว้ที่แผ่นสเตนเลสสตีลทางด้านหน้าของชุดทดลองหรือด้านที่เจ็ทอากาศพุ่งชน ส่วนทางด้านหลังได้ติดแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล (TLC) เพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลจะเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ และถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล นำภาพที่ได้มาติดตามระยะที่พิจารณา คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนหรือเลขนัสเซิลต์



รูปที่ 4 โครงสร้างการทำงานของชุดทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน

หัวฉีดเจ็ทอากาศ ทำหน้าที่เป็นหัวฉีดส่งอากาศไปยังแผ่นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบบังคับตั้งฉากกับพื้นผิวที่ระยะการทดลอง (L) เท่ากับ 40,

80, 120 และ 160 มิลลิเมตร หัวฉีดทดลองทำมาจากท่อ UPVC clear หัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร มีความยาว 1,000 มิลลิเมตร

แผ่นที่เจ็ทพุ่งชน (Impinging plate) เป็นแผ่นพื้นผิวร้อนมีลักษณะบางเรียบ ใช้เป็นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนกับเจ็ทอากาศทิศทางตั้งฉากกัน แผ่นที่เจ็ทพุ่งชนประกอบด้วย ฮีตเตอร์แบบฟิล์มมีหน้าที่เป็นพื้นผิวร้อนที่มีการกระจายความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น Model :KH-1212 กว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนคงตัว (Constant heat flux) ใช้หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าชนิดแกนหมุนควบคุมการจ่ายไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์แบบฟิล์มเพื่อให้มีอุณหภูมิพื้นผิวที่เหมาะสมขณะทดลอง ได้มีการติดตั้งแผ่นสเตนเลสสตีลกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และหนา 0.15 มิลลิเมตร ระหว่างแผ่นฮีตเตอร์กับแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเพื่อการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล (TLC) การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ Model: LCS-95 มีความกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ติดตั้งอยู่ด้านหลังของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อวัดค่าอุณหภูมิของพื้นผิว ซึ่งแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีไปตามอุณหภูมิ ถ่ายภาพพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยกล้องดิจิทัล เพื่อนำภาพที่ได้มาคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

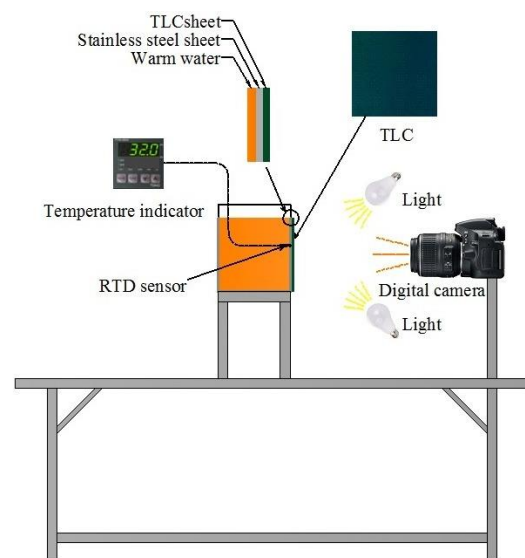
3.2 วิธีการทดลอง

โดยะแกรมการทำงานของชุดทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้แสดงในรูปที่ 4 อุปกรณ์ประกอบด้วยพัดลมอัดอากาศแรงดันสูงทำหน้าที่ส่งจ่ายอากาศไปยังหัวฉีดเจ็ทอากาศซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบเพื่อปรับอัตราการไหลด้วยอินเวอร์เตอร์ อากาศไหลผ่านฮีตเตอร์ลมร้อนจากบาทที่เชื่อมต่อกับเครื่องปรับกำลังไฟฟ้าและชุดควบคุมอุณหภูมิเจ็ทอากาศ (ตั้งค่าไว้ที่ 27°C) $T_j=27^{\circ}\text{C}$ ร่วมกับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ RTD ที่ติดตั้งไว้บริเวณทางเข้าเพื่อวัดอุณหภูมิเจ็ทอากาศ อากาศไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลอากาศแบบโรตารี่เมตร อัตราการไหลอากาศในรูปของเลขเรย์โนลด์ส์ด้วยสมการที่ 6 (เลขเรย์โนลด์ส์ $Re=5000$ $10,000$ $15,000$ และ $20,000$) อากาศไหลยังหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร ที่ได้ติดตั้งไว้ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน (L) เท่ากับ 40, 80, 120 และ 160 มิลลิเมตร ($L/D=2$, 4, 6, และ 8) ปรับหม้อแปลง

ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับชุดทดลองให้เหมาะสมกับช่วงการวัดอุณหภูมิด้วยแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล TLC ในการทดลองครั้งนี้ได้จ่ายกำลังไฟฟ้า q ให้กับชุดทดลอง 36.77 W ($Re=5000$), 47.10 W ($Re=10,000$), 57.38 W ($Re=15,000$) และ 67.73 W ($Re=20,000$) รองจากการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเข้าสู่สภาวะสมดุลใช้ระยะเวลาประมาณ 10 นาที ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลแล้วนำมาคำนวณการถ่ายเทความร้อนหรือเลขนัสเซิลต์ต่อไป

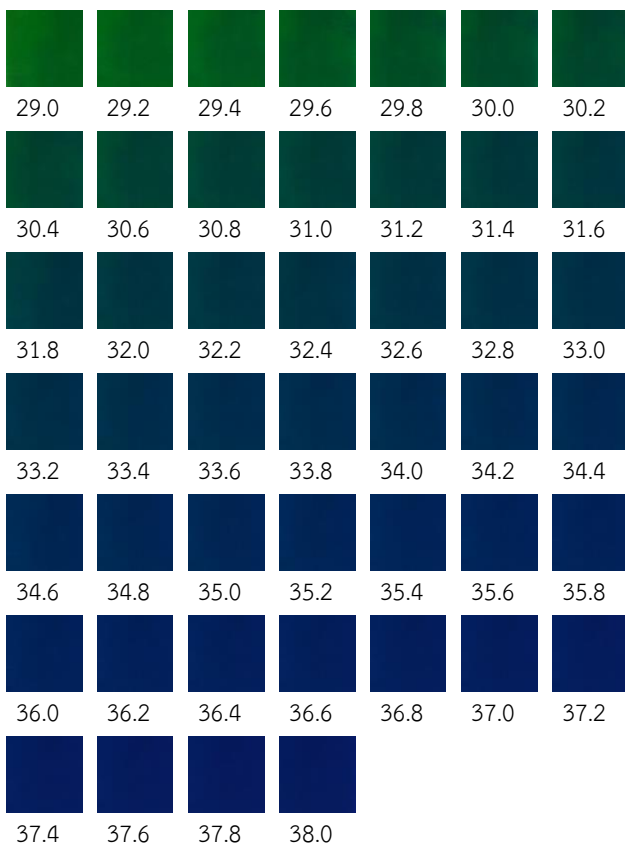
3.3 การวัดอุณหภูมิพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล

ในการวัดอุณหภูมิพื้นผิวโดยแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล จำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับการวัดอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD เปรียบเทียบกับสีที่ได้จากแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล TLC จากภาพถ่ายที่ได้แสดงเป็น (Red Green Blue, RGB) ต้องแปลงค่าให้เป็นค่าเฉดสีในรูปของ (Hue) ชุดสอบเทียบสีประกอบด้วย ถังสีเหลี่ยมทำมาจากสเตนเลสสตีลบาง ที่ได้มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD เพื่อใช้วัดอุณหภูมิพื้นผิวที่ด้านในของถัง และด้านนอกได้มีการติดแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล TLC เพื่อวัดอุณหภูมิพื้นผิวเช่นกัน การสอบเทียบกับการทดลองจะอยู่สภาวะเดียวกันกับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ชุดสอบเทียบสีแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลกับอุณหภูมิที่วัดด้วย RTD

การสอบเทียบเริ่มจากเต็มน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 45 °C ใส่ในถังที่ได้เตรียมไว้ จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิเย็นลงจากสูงสุดถึงต่ำสุดที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลสามารถวัดค่าได้ (38 °C ถึง 29 °C) แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลจะเปลี่ยนตามอุณหภูมิถ่ายภาพแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเมื่ออุณหภูมิลดลงทุกๆ 0.2 °C ซึ่งสังเกตจากอุปกรณ์แสดงค่าอุณหภูมิที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD ภายในถัง และภาพถ่ายจากแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ RTD ได้แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ภาพถ่ายสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิ 29 °C ถึง 38 °C

การกำหนดเฉดสีในเทอมของ RGB ภาพถ่ายที่ได้จากแผ่นแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล TLC จะแสดงระบบสี RGB มีสีหลักแดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งมี 3 เฉดสีและมีความซับซ้อนในการสร้าง

ความสัมพันธ์เพื่อเป็นเป็นอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้จึงได้แปลงเป็น Hue ในเทอมของ RGB ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\text{Hue} = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(G - B)}{2R - G - B}\right) \quad (1)$$

เมื่อ Hue เฉดสีในเทอมของ RGB (Hue in terms of RGB)

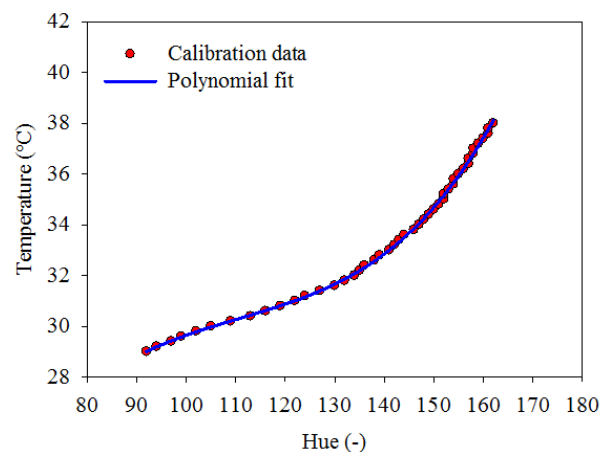
R ค่าความเข้มขององค์ประกอบสีแดง

G ค่าความเข้มขององค์ประกอบสีเขียว

B ค่าความเข้มขององค์ประกอบสีน้ำเงิน

นำผลทดลองที่ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉดสี (Temperature & Hue) ใช้โปรแกรมที่เขียนความสัมพันธ์ RGB กับ Hue ดังสมการที่ 1 ไว้แล้ว นำภาพที่ได้จากการทดลองเทียบอุณหภูมิที่ได้จาก RTD กับสีที่ได้จากภาพถ่ายแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล TLC ดังแสดงในรูปที่ 6 จากอุณหภูมิ 29 °C จนถึง 38 °C สร้างความสัมพันธ์ระหว่างเฉดสี Hue และอุณหภูมิผกผันหรือพื้นผิว T_w ในรูปของสมการโพลิโนเมียล ดังสมการที่ 2 และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉดสีดังแสดงในรูปที่ 7

$$T_w = 0.0000000853H^4 - 0.0000059033H^3 - 0.0043369171H^2 + 0.7723829673H - 6.8511467463 \quad (2)$$



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าเฉดสี

4. การวิเคราะห์

ในการวิจัยครั้งนี้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์เพื่อคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอบนพื้นผิว ดังเช่น พลักซ์ความร้อนความร้อนบนพื้นผิว สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ เลขนัสเซลล์เฉพาะที่ และเลขเรย์โนลด์ส สามารถพิจารณาได้ดังนี้

พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ได้จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ชุดทดลอง $q=36.77$ W, 47.10 W, 57.38 W และ 67.73 W สำหรับเลขเรย์โนลด์ส ($Re=5000$, $10,000$, $15,000$ และ $20,000$) ตามลำดับ ชุดทดลองขนาดเท่ากับกับฮีตเตอร์ที่มีขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ($A=0.09$ m²) ซึ่งติดที่ด้านหน้าของแผ่นสแตนเลสสตีล ทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{input} = \frac{q}{A} = \frac{IV}{A} \quad (3)$$

เมื่อ	$\dot{q}_{input}$	ฟลักซ์ความร้อน (W/m ²)
	q	กำลังไฟฟ้า (W)
	I	กระแสไฟฟ้า (A)
	V	แรงดันไฟฟ้า (V)
	A	พื้นที่ผิวสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน (0.09 m ²)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (h) เนื่องจากเจ็ทอากาศพุ่งชน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{q}_{input}}{T_w - T_j} \quad (4)$$

เมื่อ	h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ (W/m ² °C)
	T_w	อุณหภูมิผนังจากสมการที่ 2 (°C)
	T_j	อุณหภูมิเจ็ทอากาศวัดค่าด้วยเซนเซอร์ RTD ที่ทางเข้า 27°C
		เลขนัสเซลล์เฉพาะที่ (Nu) สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ	Nu	เลขนัสเซลล์เฉพาะที่ (-)
	D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของหัวฉีด (m)
	k	ค่าการนำความร้อนของเจ็ทอากาศ (W/m °C)
		เลขเรย์โนลด์ส (Re) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (6)$$

เมื่อ	Re	เลขเรย์โนลด์ส (-)
	$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
	μ	ความหนืดพลวัต (N s/m ²)

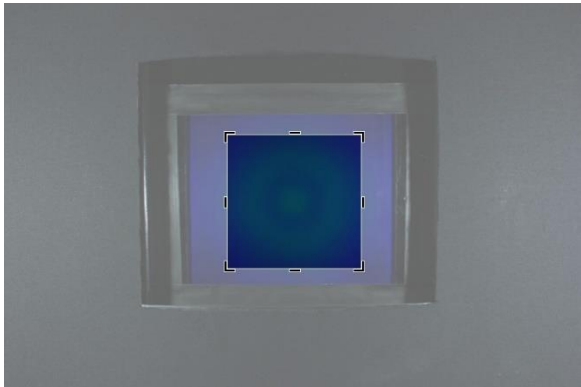
5. การหาการถ่ายเทความร้อนหรือเลขนัสเซลล์

นำภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทอากาศพุ่งชนมาวิเคราะห์ ดังเช่น การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บนพื้นผิว การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บนพื้นผิวแบบ 3 มิติ และเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.1 การตัดภาพที่ได้จากการทดลอง

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนแผ่นเรียบและพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแผ่นเรียบได้รับการศึกษาโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตัล (TLC) จำเป็นต้องกำหนดพื้นที่หรือขอบเขตในการวิเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของเจ็ทพุ่งชนมากเกิดการถ่ายเทความร้อนน้อยทำให้อุณหภูมิพื้นผิวสูงเกินค่าแผ่น TLC วัดได้ มีวิธีการตัดภาพดังนี้ นำภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองมาตัดให้ได้ขนาดเทียบเท่าขนาดจริง 160 mm x 160 mm การทดลองครั้งนี้ศึกษาระยะรัศมีห่างจากจุดศูนย์กลาง Stagnation point ด้านละ 80 mm จุดศูนย์กลาง Stagnation point หรือ $X/D=0$ และ $Y/D=0$ พิจารณาแกน X (X -Axis) จากจุดศูนย์กลางไปทางด้านซ้ายหรือทางด้าน $-X$ ระยะห่าง 80 มิลลิเมตร ซึ่งการทดลองครั้งนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล

(equivalent diameter) เท่ากัน 20 มิลลิเมตร จะได้สัดส่วนระยะ $X/D=4$ ถึง และทางด้านขวาหรือทางด้าน $+X$ ระยะห่าง 80 mm จะได้สัดส่วนระยะ $X/D=4$ รวมเป็น 160 mm พิจารณาแกน Y (Y -Axis) ในทำนองเดียวกัน แสดงในรูปที่ 8 และจะได้ภาพถ่ายที่ตัดแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 การตัดภาพถ่ายจากการทดลอง

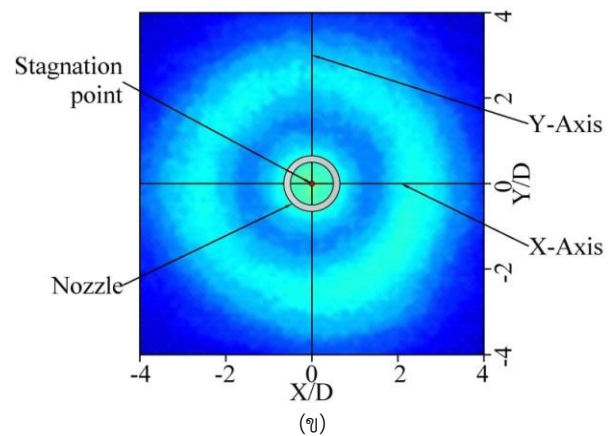
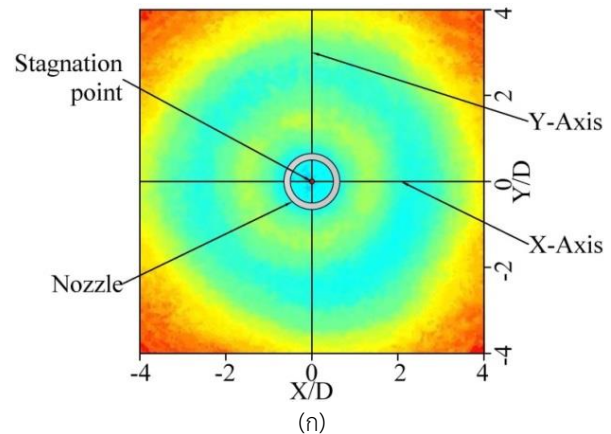


รูปที่ 9 ภาพที่ตัดเสร็จ

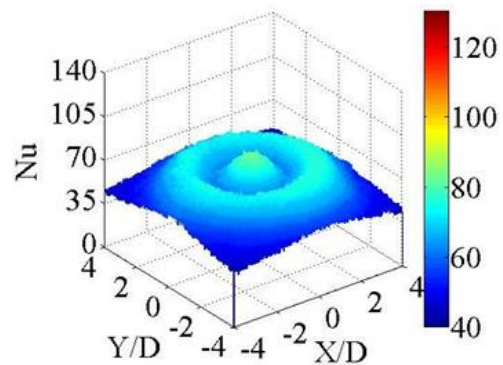
5.2 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Temperature analysis)

นำเข้าภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองและได้ตัดตามขนาดที่สนใจ พิจารณา ใส่ค่าตัวแปร (parameter) โปรแกรม ดังเช่น กำลังไฟฟ้า พื้นที่หน้าพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ขนาดความกว้าง 0.3 m และความสูง 0.3 m จะได้ ($A=0.09 \text{ m}^2$) อุณหภูมิของเจ็ทอากาศ ($T_j=27^\circ\text{C}$) ค่าการนำความร้อนของอากาศที่ 27°C ($k=0.0263 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเจ็ทอากาศ ($D=0.02 \text{ m}$) อุณหภูมิผนังหรือพื้นผิวชุดทดลอง T_w ได้จากสมการที่ (3.2) แทนค่าในสมการที่ 3 และ 4 จะได้เลขนัสเซลต์เฉพาะที่ (Nu) สมการที่ 5 นำข้อมูลออกเป็นเมตริกซ์ (Metric) ใน (Microsoft excel) และนำ

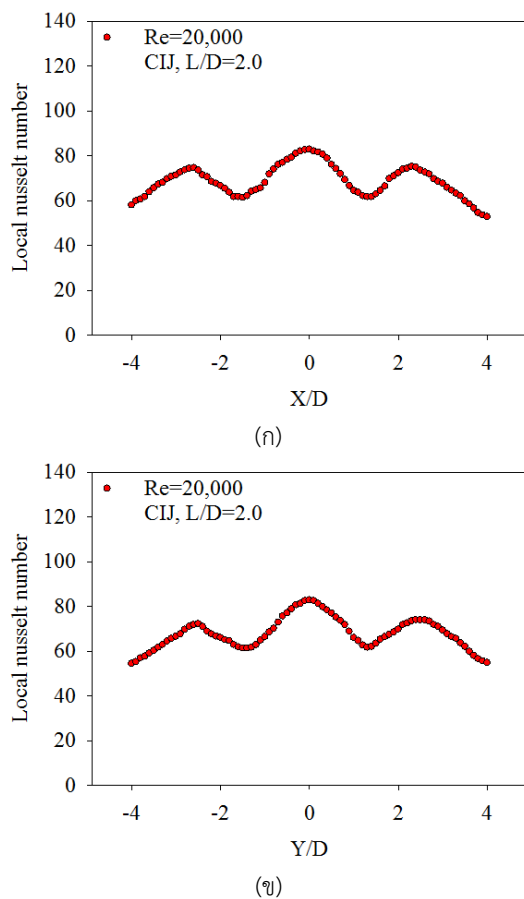
ข้อมูลที่ได้มาพล็อตการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิว การกระจายตัวของเลขนัสเซลต์บนพื้นผิว การกระจายตัวของเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวแบบ 3 มิติ และเลขนัสเซลต์เฉพาะที่ ดังแสดงในรูปที่ 10(ก), 10(ข), 11 และ 12 ตามลำดับ



รูปที่ 10 (ก) การกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิว และ (ข) การกระจายตัวของเลขนัสเซลต์บนพื้นผิว



รูปที่ 11 การกระจายตัวของเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวแบบ 3 มิติ



รูปที่ 12 เลขนัสเซลล์เฉพาะที่ (ก) แนวแกน X : (ข) แนวแกน Y

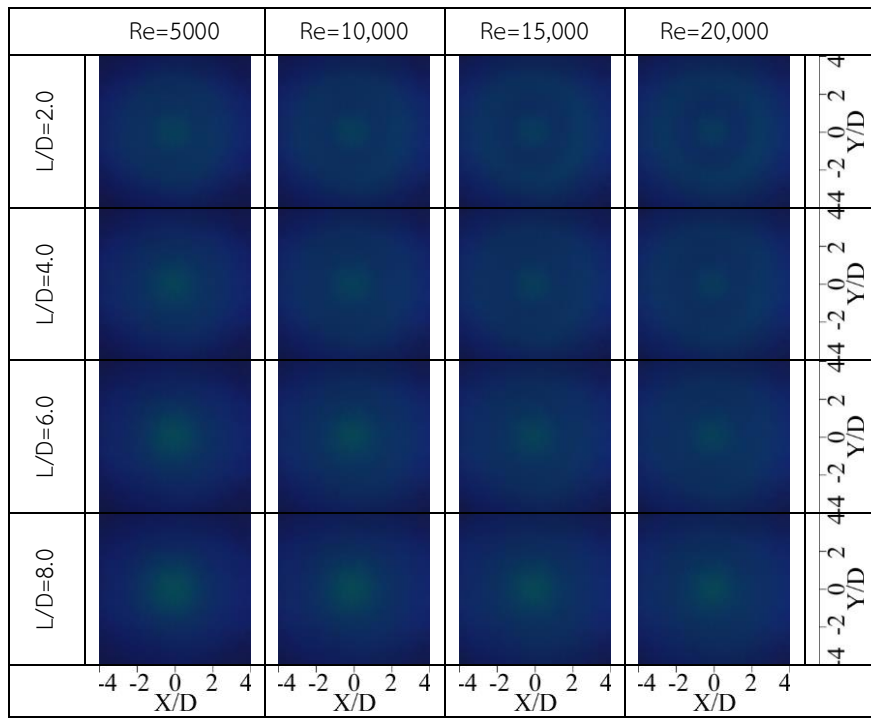
6. ผลการทดลอง

6.1 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

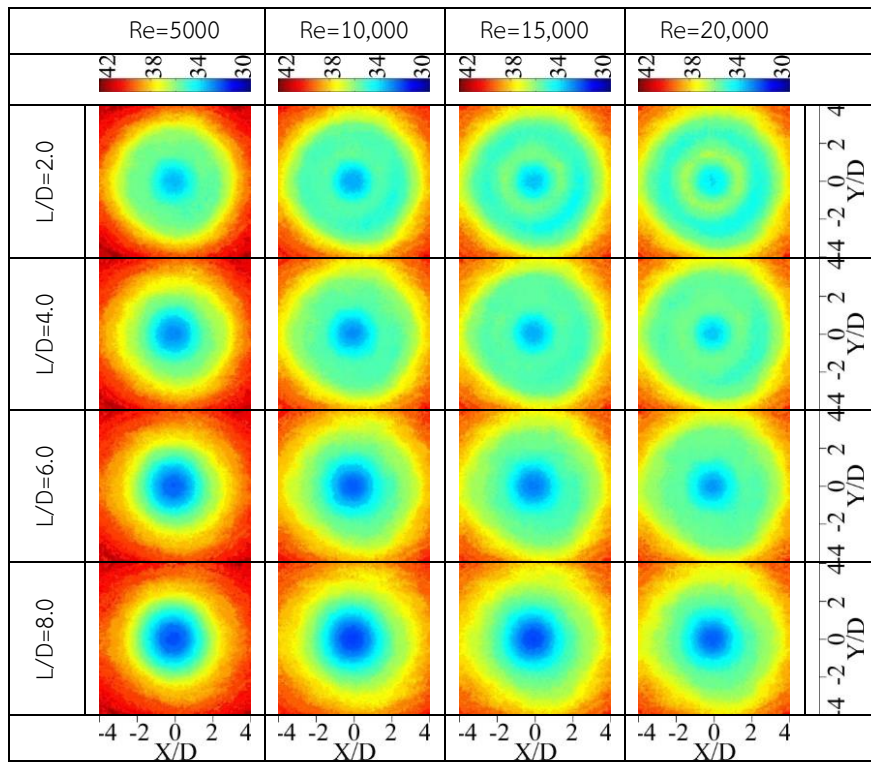
การทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทแบบดั้งเดิม (Conventional impinging jet, CIJ) ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยแผ่น TLC (Thermochromatic liquid-crystal sheet) ใช้อากาศเป็นของไหลทดลองที่อัตราการไหลในรูปของเลขเรย์โนลด์ส ($Re=5000, 10,000, 15,000$ และ $20,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($L/D=2.0, 4.0, 6.0$ และ 8.0) ทำการวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยแผ่น TLC หรือการกระจายสีบนแผ่น TLC การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บนพื้นผิว การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บนพื้นผิวแบบ 3 มิติ เลขนัสเซลล์เฉพาะที่ และเลขนัสเซลล์เฉลี่ย

จากรูปที่ 13 แสดงการกระจายสีบนแผ่น TLC การพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน ผลการทดลองแสดงให้เห็นสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC มีสีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) จากการสอบเทียบสีของแผ่น TLC แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิต่ำเป็นสีเขียว และอุณหภูมิสูงขึ้นจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ผลการทดลองพบว่าบริเวณจุดศูนย์กลาง (Stagnation point) จะปรากฏเป็นสีเขียวแสดงถึงอุณหภูมิต่ำเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีบริเวณศูนย์กลางของพื้นผิวเนื่องจากลำเจ็ทพุ่งชน และสีบนแผ่น TLC จะค่อย ๆ เข้มขึ้นจนกลายเป็นสีน้ำเงินที่ระยะตามแนวรัศมีเพิ่มแสดงถึงผลกระทบของเจ็ทพุ่งชนลดน้อยลง จากรูปที่ 14 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิว ผลการทดลองที่แสดงการกระจายอุณหภูมิบนแผ่น TLC ยังไม่ชัดเจนเพียงพอ จึงได้แสดงการกระจายอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปหาต่ำจะแสดงสีแดง เหลือง ฟ้า น้ำเงิน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าบริเวณที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางตามแนวรัศมีมากหรือบริเวณรอบนอกจะปรากฏเป็นสีแดงแสดงถึงอุณหภูมิสูง และบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะปรากฏเป็นสีน้ำเงินแสดงถึงอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงการกระจายอุณหภูมิด้วยแผ่น TLC เนื่องจากการทดลองครั้งนี้แต่ละเลขเรย์โนลด์สได้ใช้พลังงานไฟฟ้า (q) ต่างกัน สีที่ปรากฏบนแผ่น TLC และการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวใช้สำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อน

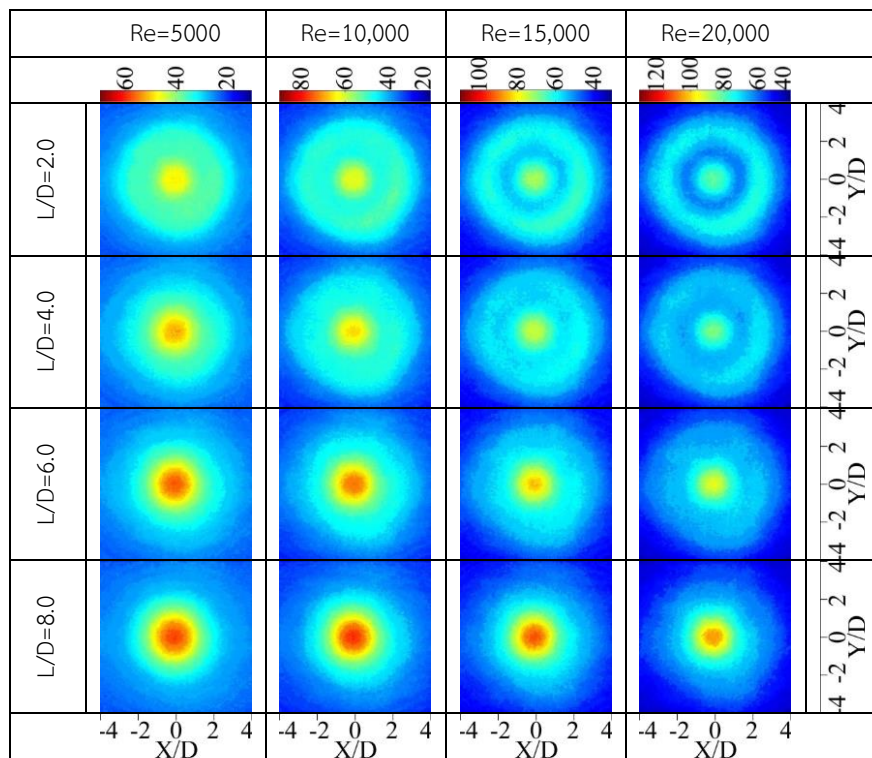
จากรูปที่ 15 แสดงการกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้นำเสนอในรูปของเลขนัสเซลล์ (Nusselt number, Nu) แบบ 2 มิติ แสดงแถบสีเพื่อสามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น จากเลขนัสเซลล์ที่มีค่าสูงไปหาต่ำจะแสดงสีแดง เหลือง ฟ้า น้ำเงิน ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณจุดศูนย์กลางของพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชนจะปรากฏเป็นสีแดงสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงการกระจายอุณหภูมิด้วยแผ่น TLC และการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวซึ่งแสดงอุณหภูมิต่ำ จากรูปที่ 16 แสดงการกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บนพื้นผิวแบบ 3 มิติหรือมุมมองแบบไอโซเมตริก (Isometric view) การนำเสนอในรูปแบบ 3 มิติจะมีความชัดเจนมากขึ้นยิ่งกว่าแบบ 2 มิติ ซึ่งมีทั้งแถบสีและปริมาณ ผลการทดลองแสดงเลขนัสเซลล์ที่มีค่ามากจะมีความสูงมากพร้อมทั้งแสดงแถบสีเหมือนแบบ 2 มิติ



รูปที่ 13 การกระจายสีบนแผ่น TLC



รูปที่ 14 การกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิว



รูปที่ 15 การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์บนพื้นผิว

6.2 อิทธิพลของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน (L/D)

จากรูปที่ 17 แสดงอิทธิพลของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน (L/D) ต่อเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ผลการทดลองเจ็ทพุ่งชนพบว่า ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนมากที่สุด $L/D=8.0$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนรูปแบบของเลขนัสเซลล์เฉพาะที่สูงสุดที่จุดศูนย์กลางของพื้นผิว (Stagnation point) หรือที่ระยะตามแนวรัศมี ($X/D=0.0$ และ $Y/D=0.0$) และมีค่าลดลงตามการเพิ่มระยะตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลาง มีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนน้อยสุด $L/D=2.0$ ให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉพาะที่บริเวณจุดศูนย์กลางน้อยสุด น้อยกว่า $L/D=4.0, 6.0$ และ 8.0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 17 และยังพบว่าระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนน้อยสุด $L/D=2.0$ ปรากฏเลขนัสเซลล์สูงช่วงที่สอง ที่ระยะจากจุดศูนย์กลางตามแนวรัศมี $X/D=2.0$ ถึง $X/D=3.0$ ทั้งนี้อาจเกิดจากอิทธิพลของโครงสร้างกระแสไหลวน (Vortex structure) ที่พุ่งชนพื้นผิวก่อนจะเปลี่ยนแปลงเป็นชั้นขอบเขต (Boundary layer) ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนเพิ่มขึ้นส่งผลให้เลขนัสเซลล์

เฉพาะที่บริเวณจุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และเลขนัสเซลล์สูงช่วงที่สองปรากฏขึ้นน้อยลง

6.3 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส (Re)

จากรูปที่ 18 แสดงอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส (Re) ต่อเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ ผลการทดลองเจ็ทพุ่งชนพบว่าเลขเรย์โนลด์สสูงสุด ($Re=20,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนมากที่สุด ($L/D=8.0$) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซลล์เฉพาะที่สูงสุดที่จุดศูนย์กลางของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนเดียวกัน เลขนัสเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์สอย่างเห็นได้ชัดและยังพบว่าอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์สส่งผลต่อเลขนัสเซลล์มากกว่าระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ทั้งอาจเกิดจากที่เลขเรย์โนลด์สสูงจะมีความเร็วและโมเมนตัมในการพุ่งชนมากกว่าที่เลขเรย์โนลด์สต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 18 ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($L/D=8.0$) และเลขเรย์โนลด์ส ($Re=5000$ ถึง $20,000$) มีแนวโน้ม (Trend) คล้ายกันคือเลขนัสเซลล์สูงสุดที่จุด

ศูนย์กลางและค่อยๆ ลดลง มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อย ($L/D=2.0$) และเลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ ($Re=5000$) ยังปรากฏเลขนัสเซลล์สูงช่วงที่สองอยู่บ้าง และเลขนัสเซลล์สูงช่วงที่สองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์ เลขนัสเซลล์สูงช่วงที่สองมีค่าสูงสุดที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อย ($L/D=2.0$) และเลขเรย์โนลด์ส์สูงสุด ($Re=20,000$)

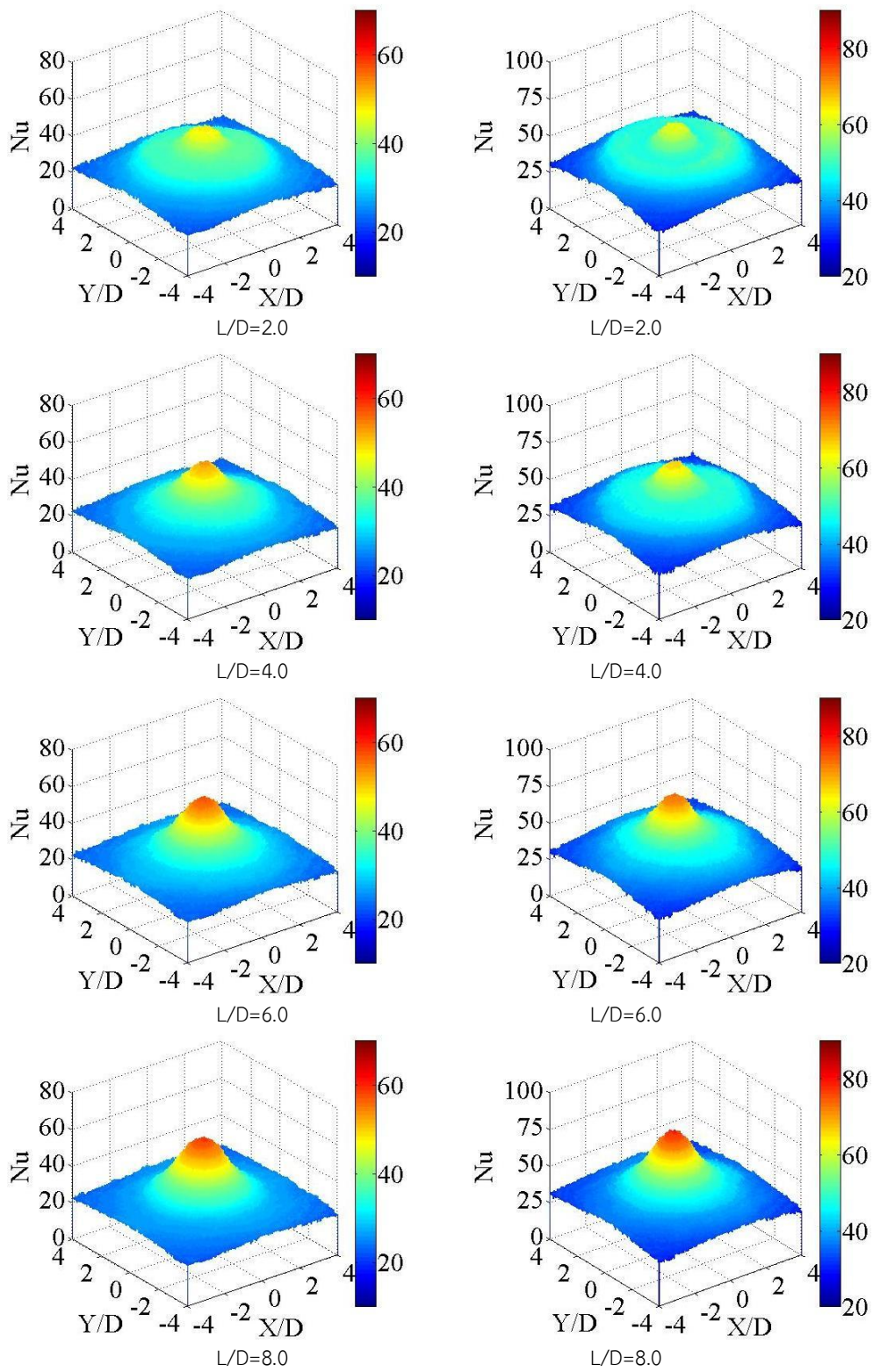
6.4 การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

จากรูปที่ 19 แสดงอิทธิพลของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน (L/D) และเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว ที่เลขเรย์โนลด์ส์เดียวกันพบว่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมีค่าสูงสุดที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยสุด ($L/D=2.0$) และเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ที่เลขเรย์โนลด์ส์ $Re=20,000$ และ $L/D=2.0$ ให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมากกว่า $L/D=4.0$, 6.0 และ 8.0 เท่ากับ 1.0% , 1.6% และ 3.1% ตามลำดับ ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน

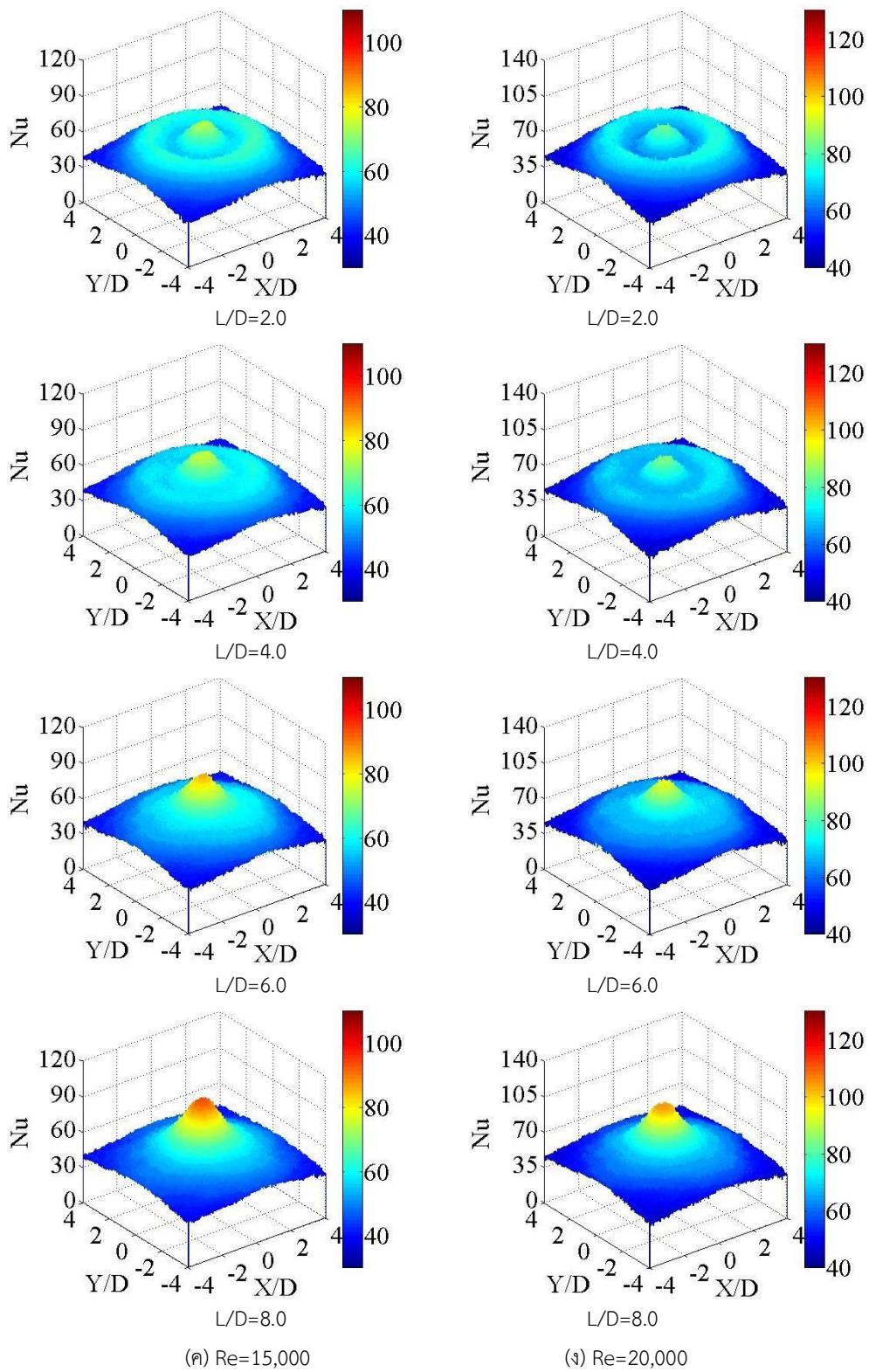
เดียวกัน พบว่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมีค่าสูงสุดที่เลขเรย์โนลด์ส์มากที่สุด ($Re=20,000$) และเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์ ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $L/D=2.0$ และ $Re=20,000$ ให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยมากกว่า $Re=15,000$, $10,000$ และ 5000 เท่ากับ 17.6% , 46.8% และ 106.5% ตามลำดับ

7. สรุปผลการทดลอง

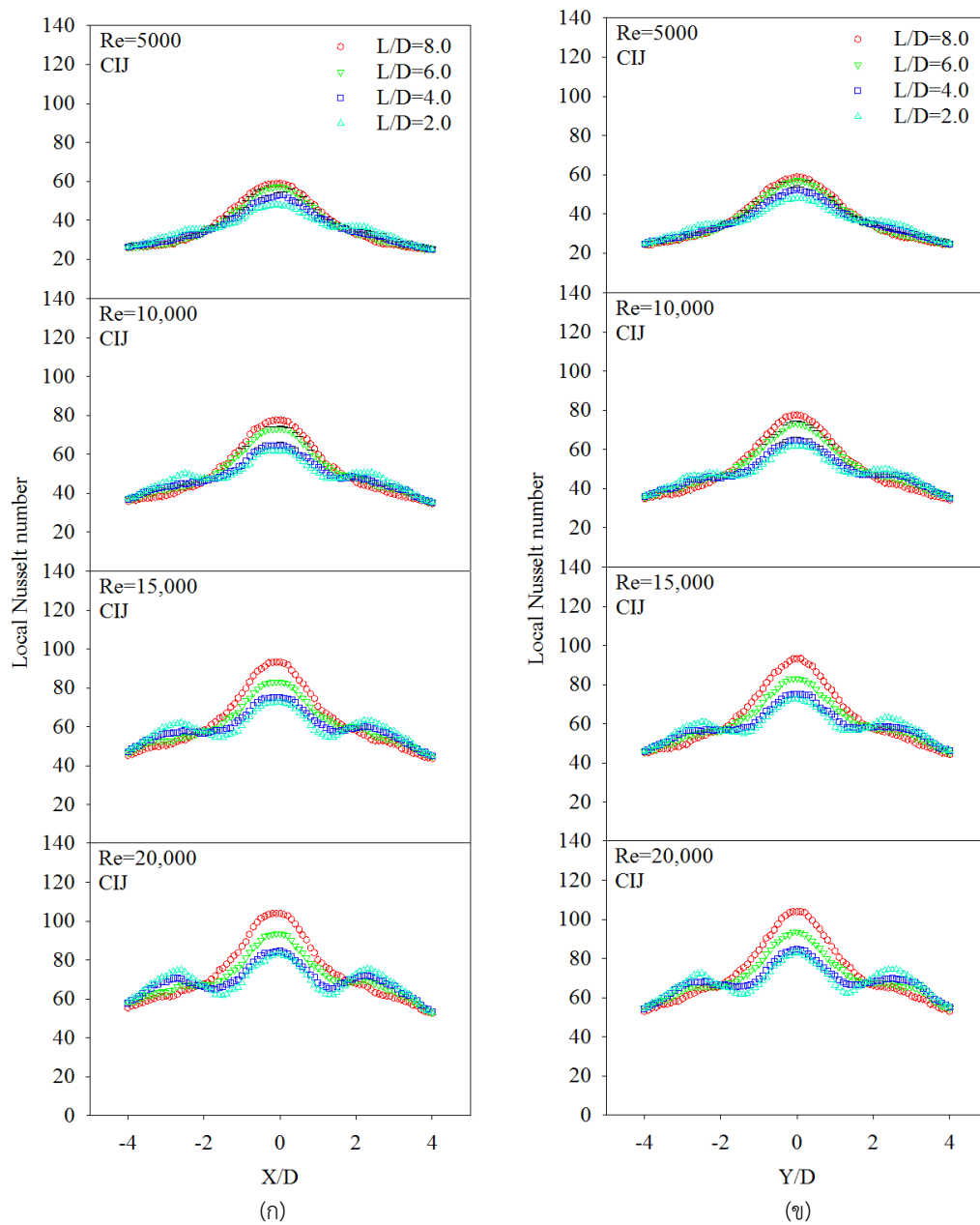
ผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบด้วยเจ็ทอากาศพุงชน ซึ่งใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตัลในการวัดการกระจายอุณหภูมิ ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ $Re=5000$ ถึง $20,000$ และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $L/D=2$ ถึง 8 ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์อย่างเห็นได้ชัด และผลการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสูงสุดที่เลขเรย์โนลด์ส์ $Re=20,000$ และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $L/D=2$

(n) $Re=5000$ (ข) $Re=10,000$

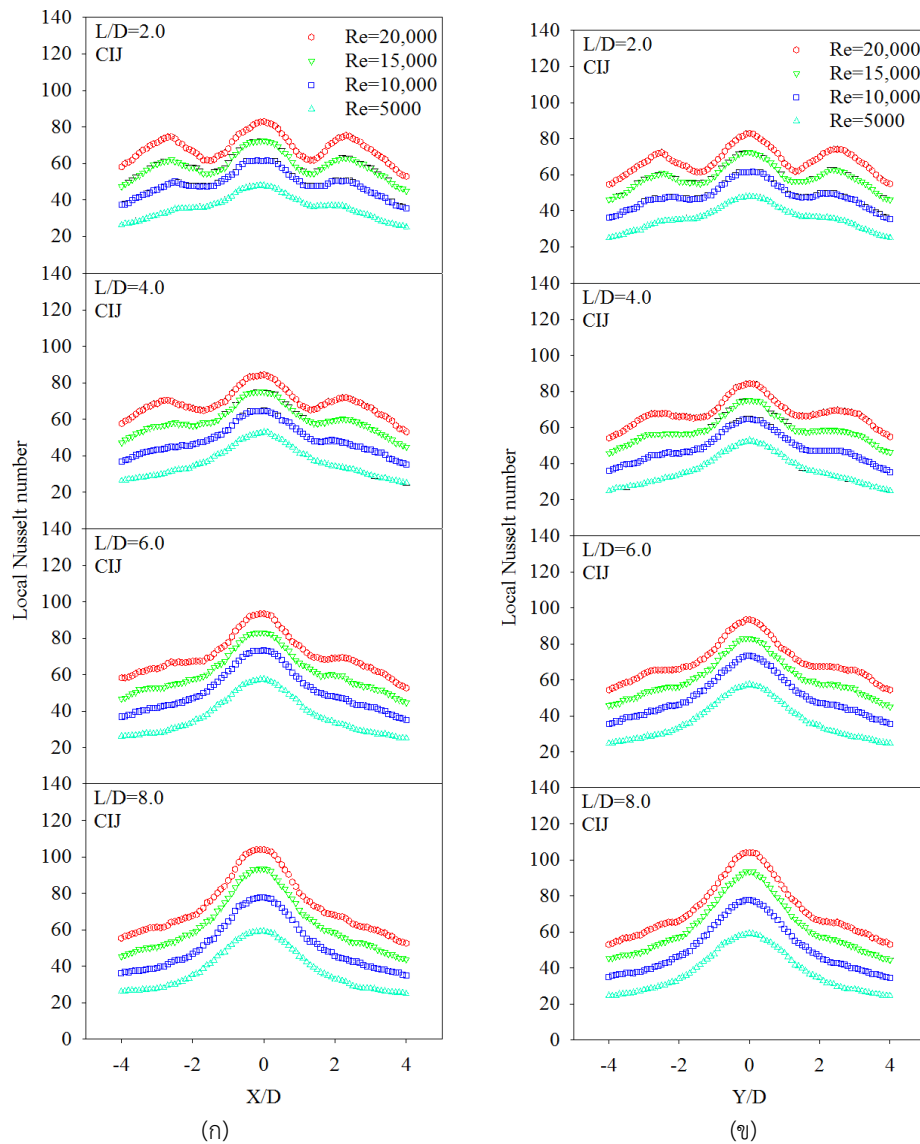
รูปที่ 16 การกระจายตัวของเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวแบบ 3 มิติ



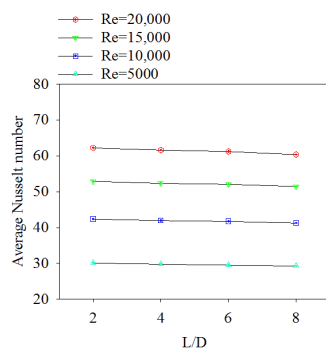
รูปที่ 16 การกระจายตัวของเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิวแบบ 3 มิติ (ต่อ)



รูปที่ 17 อิทธิพลของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพังชน (L/D) ต่อเลขนัสเซลล์เฉพาะที่ (ก) แนวแกน X : (ข) แนวแกน Y



รูปที่ 18 อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์ (Re) ต่อเลขนัสเซลต์เฉพาะที่ (n) แนวแกน X : (ก) แนวแกน Y (ข)



รูปที่ 19 อิทธิพลของเงื้อมต่อการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Lee and S.J. Lee, "The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 555-575, 2000.
- [2] D.W. Zhou and S.J. Lee, "Forced convective heat transfer with impinging rectangular jets", International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 50, pp. 1916-1926, 2007.
- [3] P. Gulati, V. Katti and S.V. Prabhu, "Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 602-617, 2009.
- [4] L.A. Brignoni and S.V. Garimella, "Effects of nozzle-inlet chamfering on pressure drop and heat transfer in confined air jet impingement", International Journal of Heat and Mass Transfer,

- Vol. 43, pp. 1133-1139, 2000.
- [5] J. Lee and S.J. Lee, "The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3497-3509, 2000.
- [6] H.M. Hofmann, M. Kind and H. Martin, "Measurements on steady state heat transfer and flow structure and new correlations for heat and mass transfer in submerged impinging jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3957-3965, 2007.
- [7] M. Attalla and M. Salem, "Effect of nozzle geometry on heat transfer characteristics from a single circular air jet", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, pp. 723-733, 2013.



ปัจจุบันเป็นผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พ.อ. รศ.ดร. โอนทัย สุขแสงพนมรุ้ง สำเร็จ
การศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขา
AeroMechanical Engineering จาก University
of Cranfield และปริญญาโท สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล จาก Imperial College of
Science ประเทศสหราชอาณาจักร และ ปริญญา
เอกวิศวกรรมเครื่องกล จาก University of



ดร. เก่งกล้า กุณรักษ์ สำเร็จการศึกษาระดับ
ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัย
เอเชียอาคเนย์ ระดับปริญญาโทและเอก สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหา
นคร มีความสนใจงานวิจัยในเรื่องการเพิ่มการ
ถ่ายเทความร้อน งานทางด้านของไหลและความ
ร้อน และเจ็ทพุงชน



ของไหลและความร้อน และเจ็ทพุงชน

ผศ.ดร. ขวัญชัย หนาแน่น สำเร็จการศึกษาระดับ
ปริญญาเอก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจุบันเป็นอาจารย์
ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี มีความสนใจงานวิจัย
ในเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน งานทางด้าน



visualization ต่างๆ สำหรับศึกษาพฤติกรรมการไหลและความร้อน

รศ.ดร. สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด สำเร็จการศึกษาระดับ
ปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมเครื่องกลจากสถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เริ่มทำงานที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครในปี พ.ศ. 2539 มี
ความสนใจงานวิจัยในเรื่องเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเท
ความร้อนโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง งาน
ทางด้านของไหลและความร้อน และงานด้านเทคนิค