

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนแผ่นผิวเรียบ

– การทบทวนวรรณกรรม

Heat transfer enhancement of impinging jet on flat surface - A comprehensive review

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 อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง

กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ. นครนายก 26001

Manuscript received June 23, 2021

Revised June 29, 2021

บทคัดย่อ

การถ่ายเทความร้อนที่สูงของเจ็ทพุ่งชนสำหรับกระบวนการทำความเย็นและความร้อนมีความสำคัญมากในงานทางวิศวกรรม เช่น กระบวนการทำให้แห้งของกระดาษและสิ่งทอ การทำความเย็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การแช่แข็งของเนื้อเยื่อ การระบายความร้อนของใบพัดกังหันก๊าซ หน่วยความเย็น และตัวสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น รายงานฉบับนี้เสนอการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบตั้งเดิมและแบบหมุนวน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอถึงความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสำหรับเจ็ทพุ่งชนหมุนวนแบบต่างๆด้วย

คำสำคัญ: เจ็ทพุ่งชน, การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน, ความเข้มปั่นป่วน, เจ็ทหมุนวน

ABSTRACT

High-heat transfer of jet impingement for cooling and heating processes becomes more important in engineering applications such as drying processes of paper and textiles, electronic components cooling, freezing of tissue, gas turbine blades cooling, refrigeration unit, and solar collectors, etc. The comprehensive review of heat transfer intensification of jet impingement using non-swirling and swirling jets is reported in the present paper. In addition, heat transfer uniformity characteristics on surfaces of various swirling impinging jets are presented.

Keywords: Jet impingement, heat transfer intensification, turbulent intensity, swirling jet

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตในประเทศมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ได้มีเทคโนโลยีใหม่ ๆ เข้ามามีบทบาทสำคัญที่ส่งผลต่อ

การเพิ่มกำลังการผลิต รวมถึงการลดต้นทุนในการผลิตและการประหยัดพลังงาน การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรืออุปกรณ์ระบายความร้อนจึงมีบทบาทสำคัญที่จะช่วยประหยัดพลังงาน มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เป็นการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และมีผลทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดเล็กลง ลดพื้นที่ในการติดตั้ง และยังทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงด้วย ทั้งนี้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทพุ่มชนมีความสำคัญมากในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ และอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ รวมไปถึงการระบายความร้อนในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ผนังห้องเผาไหม้ ใบพัดแก๊สเทอร์โบ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงได้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวชิ้นงาน

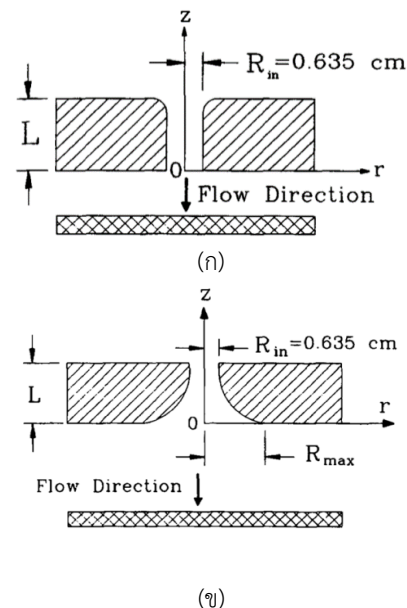
บทความนี้ได้รวบรวมงานวิจัยการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่มชนบนแผ่นเรียบ อิทธิพลของรูปร่างหน้าตัดเจ็ท เจ็ทไม่หมุนควง เจ็ทหมุนควง มุมเอียงกระแสการไหลของเจ็ทหมุนควง อัตราการไหลในรูปของเลขเรย์โนลด์ส ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่มชน เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่อไป

2. เจ็ทแบบดั้งเดิมและเจ็ทไม่หมุนควง

ในปี ค.ศ. 1996 Colucci และ Viskanta [1] ได้ศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปร่างของหัวฉีดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน การทดลองใช้หัวฉีดออร์ฟิซขอบคม (sharp-edged orifice) และหัวฉีดไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 1 ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=10,000$ ถึง $50,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่มชน ($H/D=0.25$ ถึง 6.0) วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตัล ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าหัวฉีดไฮเพอร์โบลิกให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดออร์ฟิซขอบคม และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส

ในปี ค.ศ. 1997 Ashforth-Frost และคณะ [2] ได้ศึกษาลักษณะความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทพุ่มชนด้วยหัวฉีดแบบสล็อตพุ่มชน ดังแสดงในรูปที่ 2 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=20,000$) และระยะทางออกหัวฉีดแบบสล็อตถึงพื้นผิวพุ่มชน ($H/B=4$ ถึง 9.2) วัดค่าความเร็วด้วยแอนนิโมมิเตอร์แบบเส้น

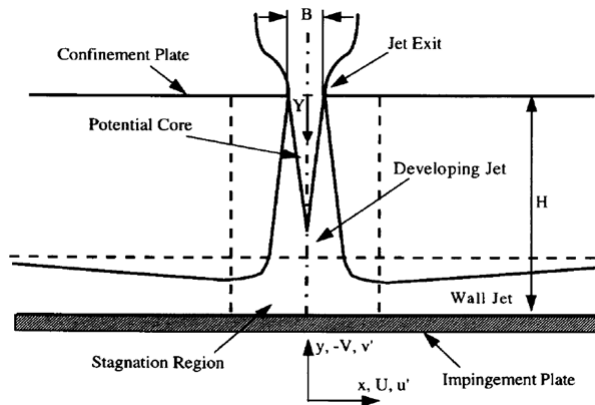
ลวดความร้อน (hot-wire anemometer) ผลการทดลองพบว่าความเร็วและความปั่นป่วนที่วัดได้สอดคล้องกับการถ่ายเทความร้อน การทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดแบบสล็อตถึงพื้นผิวพุ่มชนน้อย ($H/B=4$) อยู่ในโซนแกนโพเทนเชียลพบว่ามีความปั่นป่วนน้อยที่จุดศูนย์กลาง และจะเกิดความปั่นป่วนบริเวณการเปลี่ยนจากช่วงเจ็ทพุ่มชนเป็นเจ็ทผนัง เมื่อระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่มชนอยู่ในช่วงแกนโพเทนเชียลส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงช่วงที่สองที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางตามแนวรัศมี และการทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดแบบสล็อตถึงพื้นผิวพุ่มชนมาก ($H/B=9.2$) หรืออยู่ในโซนการไหลการพัฒนา พบว่าการถ่ายเทความร้อนสูงช่วงที่สองลดน้อย เกิดความปั่นป่วนที่จุดศูนย์กลาง (Stagnation point) ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงที่บริเวณศูนย์กลางของแผ่นที่เจ็ทพุ่มชน



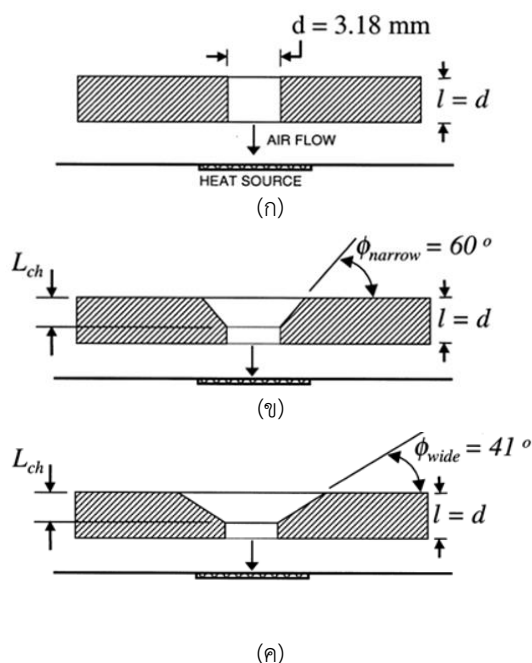
รูปที่ 1 หัวฉีดเจ็ท (ก) หัวฉีดออร์ฟิซขอบคม : (ข) หัวฉีดออร์ฟิซไฮเพอร์โบลิกของ Colucci และ Viskanta [1]

Brignoni และ Garimella [3] ศึกษาอิทธิพลของหัวฉีดที่มีการลบมุม (Chamfer) ด้านทางเข้าส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน การทดลองเจ็ทอากาศพุ่มชนด้วยหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ($D=3.18$ mm) หัวฉีด 3 ลักษณะ หัวฉีดขอบคม (ไม่มีการลบมุม) หัวฉีดลบมุม 60° และหัวฉีดลบมุม 41° ดังแสดงในรูปที่ 3 ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=5000$ ถึง $20,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่มชน ($H/d=1$ ถึง 4) ผลการทดลองพบว่าหัวฉีดที่มีการลบมุม

ด้านทางเข้าให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดขอบคม และการถ่ายเทความร้อนสูงสุดสำหรับหัวฉีดลบมุม 60° และยังพบว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์



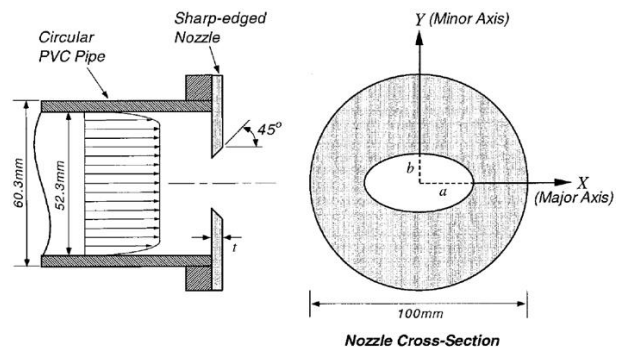
รูปที่ 2 หัวฉีดแบบสล็อตของ Ashforth-Frost และคณะ [2]



รูปที่ 3 หัวฉีดเจ็ท (ก) หัวฉีดขอบคม (ข) หัวฉีดลบมุม 60° (ค) หัวฉีดลบมุม 41° ของ Brignoni และ Garimella [3]

Lee และ Lee [4] ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนแกนหลักต่อแกนรองของหัวฉีดวงรีซึ่งส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณ

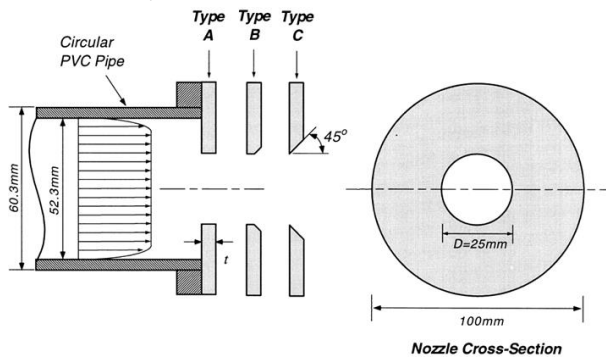
ศูนย์กลาง (Stagnation region) การทดลองมีสัดส่วนแกนหลักต่อแกนรองของหัวฉีดวงรี ($AR=a/b=1, 1.5, 2, 3$ และ 4) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (equivalent diameter) เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ ($Re=10,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=2, 4, 6$ และ 8) วัดการกระจายการถ่ายเทความร้อนด้วยเทอร์โมโครมิคคลิควิดคริสตัลร่วมกับระบบประมวลผลดิจิทัล ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D < 4$) การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนแกนหลักต่อแกนรองของหัวฉีดวงรี (AR) บริเวณศูนย์กลาง ในทางกลับกันที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D > 6$) หัวฉีดวงรีให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าหัวฉีดกลม ($AR=1$) บริเวณศูนย์กลาง



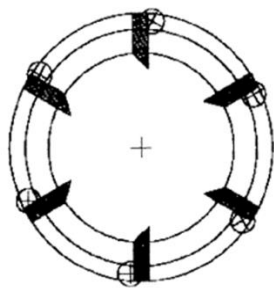
รูปที่ 4 หัวฉีดวงรีของ Lee และ Lee [4]

Lee และ Lee [5] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปร่างหัวฉีดส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบริเวณศูนย์กลาง ใช้หัวฉีดออร์ฟิสเจ็ทพุงชน การทดลองครั้งนี้เปรียบเทียบกับหัวฉีด 3 ลักษณะ หัวฉีดออร์ฟิสขอบคม (square-edged orifice nozzle) หัวฉีดออร์ฟิสขอบมาตรฐาน (standard-edged orifice nozzle) และหัวฉีดออร์ฟิสขอบแหลมคม (sharp-edged orifice nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 5 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ ($Re=5000$ ถึง $30,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=2, 4, 6$ และ 10) ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าลักษณะรูปร่างหัวฉีดส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบริเวณศูนย์กลาง หัวฉีดออร์ฟิสขอบคมช่วยให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุด สูงกว่าหัวฉีดออร์ฟิสขอบมาตรฐาน และหัวฉีดออร์ฟิสขอบแหลมคม ตามลำดับ และการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์ และการลดระยะทางออก

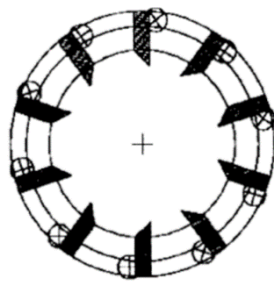
หัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน



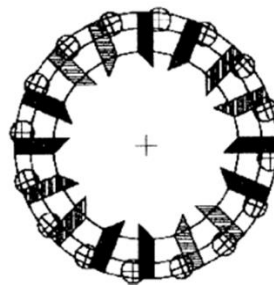
รูปที่ 5 หัวฉีดออร์ฟิสของ Lee และ Lee [5]



(ก)



(ข)

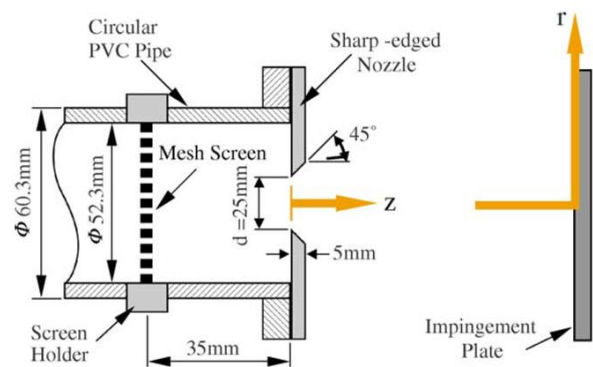


(ค)

รูปที่ 6 หัวฉีดที่มีการติดแท็บสามเหลี่ยมที่ปลายของ Gao และคณะ [6]

ในปี ค.ศ. 2003 Gao และคณะ [6] ได้มีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุงชน หัวฉีดกลมได้ติดแท็บสามเหลี่ยมเอียง 45° ที่ปลายเว้นระยะห่างเท่าๆ กัน จำนวนแท็บสามเหลี่ยม 6, 10 และ 16 ดังแสดงในรูปที่ 6 มีการปรับระยะการยื่นเข้าด้านในหัวฉีด 0.06 ถึง 0.15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $L/D=1$ ถึง 10 เลขเรย์โนลด์ส 23,000 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มจำนวนแท็บสามเหลี่ยม การลดลงของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน และการเพิ่มของระยะการยื่นเข้าด้านในหัวฉีด

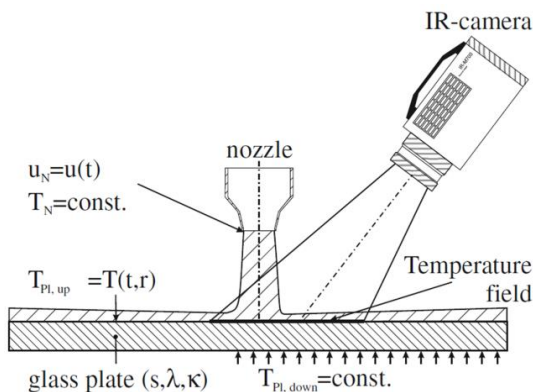
Zhou และ Lee [7] ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุงชนบนแผ่นเรียบ ใช้หัวฉีดออร์ฟิสขอบแหลมคม (Sharp-edged nozzle) และได้ติดตั้งตาข่ายในหัวฉีด ($\sigma_s=0.00, 0.25, 0.60, 0.71$ และ 0.83) ดังแสดงในรูปที่ 7 ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=15,000$) ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/d=0.2$ ถึง 10) ผลการทดลองพบว่าการติดตั้งตาข่ายในหัวฉีดทำให้ปรับโครงสร้างการไหลของเจ็ทนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของลักษณะการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ การทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/d \leq 4$) ความรุนแรงของความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นตาม (σ_s) ส่งผลให้เกิดการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 7 หัวฉีดออร์ฟิสขอบแหลมคมของ Zhou และ Lee [7]

Hofmann และคณะ [8] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและโครงสร้างการไหลของของไหล ได้ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส 14,000 ถึง 150,000 และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน (L/D) เท่ากับ 1 ถึง 10 การทดลองครั้งนี้ใช้กล้องอินฟราเรดวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่

8 ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส และมีค่าสูงที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน (L/D) น้อย นอกจากนี้ยังพบว่าการทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยจะปรากฏการถ่ายเทความร้อนสูงช่วงที่สอง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางตามแนวรัศมี และได้นำเสนอสมสัมพันธ์ในการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัย

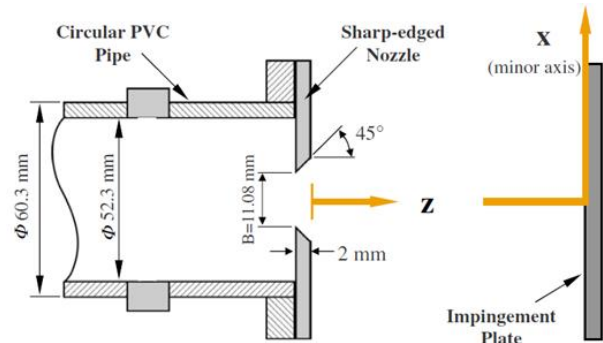


รูปที่ 8 การวัดการถ่ายเทความร้อนของ Hofmann และคณะ [8]

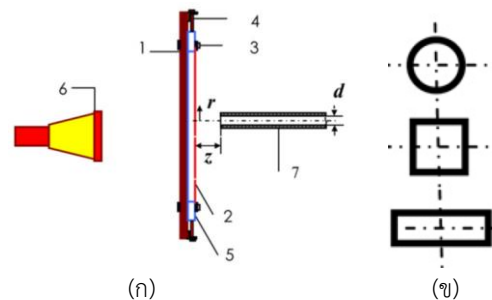
Zhou และ Lee [9] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับด้วยหัวฉีดสี่เหลี่ยมขอบแหลมคม ดังแสดงในรูปที่ 9 ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=2715$ ถึง $25,005$) ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/B=1$ ถึง 30) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส และการลดระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน และยังพบว่าความรุนแรงของความปั่นป่วนมีอิทธิพลสำคัญต่อการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่เจ็ทพุงชน

ในปี ค.ศ. 2009 Gulati และคณะ [10] ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของหัวฉีดส่งผลการกระจายการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่บนพื้นผิวเรียบ การทดลองครั้งนี้มีหัวฉีด 3 ลักษณะ ดังเช่น หัวฉีดหน้าตัดกลม หัวฉีดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหัวฉีดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้แสดงในรูปที่ 10 ใช้อากาศเป็นของไหลทดลองที่เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วงระหว่าง 5000 และ 20,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน z/d จาก 0.5 ถึง 12 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ได้ประเมินโดยใช้ภาพความร้อนที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพความร้อนแบบอินฟราเรด ผลการทดลองพบว่ารูปร่างของหัวฉีด

ส่งผลกระทบต่อเลขเรย์โนลด์สเฉลี่ยและกระจายการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ และยังพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลาง Stagnation point สูงสุดสำหรับระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $z/d=6$

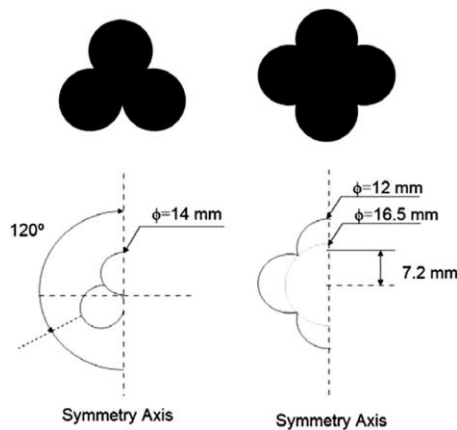


รูปที่ 9 หัวฉีดสี่เหลี่ยมขอบแหลมคมของ Zhou และ Lee [9]



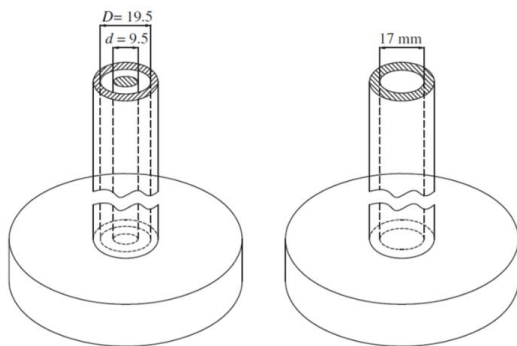
รูปที่ 10 การติดตั้งแผ่นเรียบสำหรับการกระจายความร้อน (ก) พื้นผิวที่เจ็ทพุงชน (ข) รูปร่างของหัวฉีดของ Gulati และคณะ [10]

Martin และ Buchlin [11] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยหัวฉีดหน้าตัดแบบลอนพุงชน หัวฉีดหน้าตัดแบบลอนมี 2 ลักษณะ คือหัวฉีดหน้าตัดแบบ 3 ลอน และหัวฉีดหน้าตัดแบบ 4 ลอน ดังแสดงในรูปที่ 11 ทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน (L/D) อยู่ในช่วง 1 ถึง 12 ทำการทดลองที่เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วงระหว่าง 15,000 ถึง 50,000 ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์ส และการลดของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน หัวฉีดหน้าตัดแบบ 3 ลอนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อย แต่เมื่อระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนเพิ่มขึ้นถึง $L/D>7$ พบว่าหัวฉีดหน้าตัดแบบ 4 ลอนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า

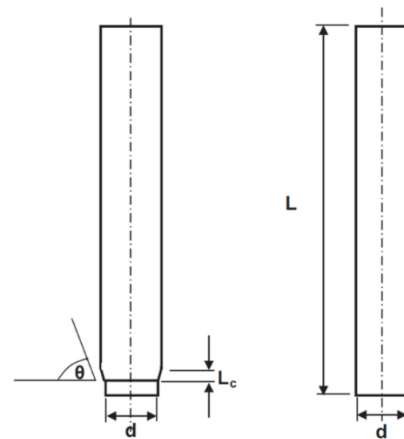


รูปที่ 11 หัวฉีดหน้าตัดแบบ 3 และ 4 ลอนของ Martin และ Buchlin [11]

Zhen และคณะ [12] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟวงแหวน ได้ทำการทดลองด้วยหัวเผาหน้าตัดแบบวงแหวนเปรียบเทียบกับหัวเผาหน้าตัดแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 12 เลขเรย์โนลด์ส 1,300 1,500 และ 1,700 ระยะหัวเผาถึงพื้นผิว 10, 20, 30, 50 และ 100 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 และ 1.5 ผลการทดลองพบว่าหัวเผาหน้าตัดวงแหวนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าหัวเผาหน้าตัดแบบดั้งเดิมที่ระยะหัวเผาถึงพื้นผิวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร แต่เมื่อระยะเพิ่มขึ้นจนถึง 70 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหัวเผาหน้าตัดแบบดั้งเดิมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า และยังพบว่าหัวเผาหน้าตัดวงแหวนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าที่บริเวณ stagnation point และจะมีค่าสูงสุดที่ระยะห่างตามแนวรัศมีประมาณ 10 ถึง 20 มิลลิเมตร



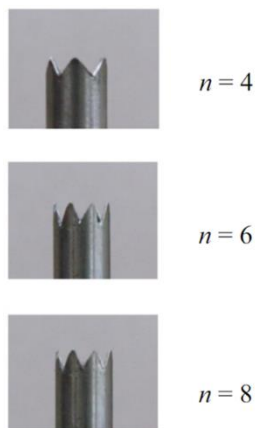
รูปที่ 12 หัวเผาหน้าตัดแบบวงแหวนและหัวเผาหน้าตัดแบบดั้งเดิมของ Zhen และคณะ [12]



รูปที่ 13 รูปร่างของหัวฉีดแบบ square แบบ chamfer ของ Attalla และ Salem [13]

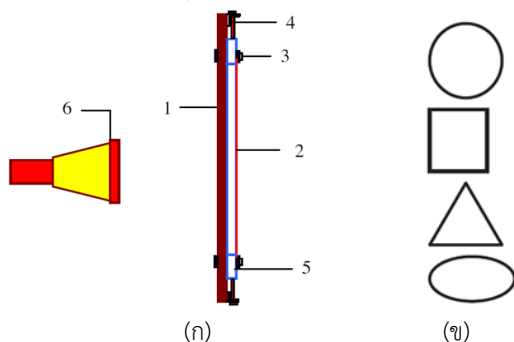
Attalla และ Salem [13] ได้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของหัวฉีดส่งต่อการถ่ายเทความร้อน หัวฉีดแบบ chamfer แต่ละหัวมีมุมเอียงแชมเฟอร์ 60° และมีระยะ chamfer 3 ค่า คือ 1 mm, 2.3 mm และ 3.65 mm เปรียบเทียบกับหัวฉีดแบบ square ดังแสดงในรูปที่ 13 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วง 6000 และ 40,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน 1 ถึง 6 ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์สและการลดลงของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน และยังพบว่าหัวฉีดแบบ square ให้ค่าเลขนัสเซลต์เฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับหัวฉีดแบบอื่น

ในปี ค.ศ. 2016 Vinze และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของหัวฉีดเซพรอนต่อการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว หัวฉีดเซพรอนมีจำนวนปลายแหลมเซพรอน 4, 6 และ 8 และมีมุมเอียงปลายเซพรอนเข้าด้านใน 0°, 5° และ 10° ดังแสดงในรูปที่ 14 เลขเรย์โนลด์ส 28,000, 35,000 และ 40,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนจาก 1 ถึง 10 ใช้เทคนิคพอยส์โลหะบางที่ใช้กล้องอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิพื้นผิว ผลการทดลองพบว่าหัวฉีดเซพรอนให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดแบบดั้งเดิม และยังพบว่าหัวฉีดที่มีจำนวนปลายแหลมเซพรอน $n=8$ และมุมเอียงปลายเซพรอนเท่ากับ 10° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด



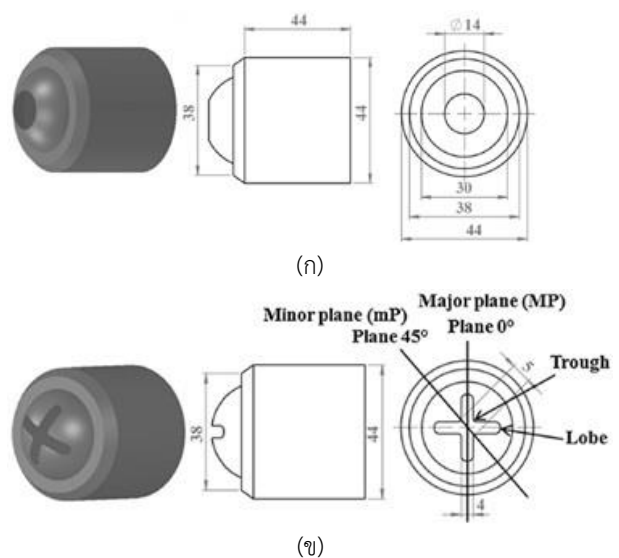
รูปที่ 14 หัวฉีดเซฟรอนของ Vinze และคณะ [14]

ในปี ค.ศ. 2016 Meena และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองอิทธิพลของรูปร่างของหัวฉีดออริฟิส หัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลประมาณ 5.7 mm การทดลองครั้งนี้มีหัวฉีด 4 ลักษณะ หัวฉีดกลม หัวฉีดสี่เหลี่ยม หัวฉีดสามเหลี่ยม และหัวฉีดวงรี ดังแสดงในรูปที่ 15 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วงระหว่าง ($Re=5000$ และ $30,000$) ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=0.5, 1, 2, 4, 6$ และ 8) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนประเมินค่าโดยใช้ภาพความร้อนที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด ผลการทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=4, 6$ และ 8) พบว่าหัวฉีดกลมให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยสูงสุด สูงกว่าหัวฉีดวงรี หัวฉีดสี่เหลี่ยม และหัวฉีดสามเหลี่ยม ตามลำดับ และพบว่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส และนอกจากนี้ยังพบว่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยบนพื้นผิวมีค่าสูงสุดที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=4$)



รูปที่ 15 ชุดทดลอง (ก) แผ่นที่เจ็ทพุงชน : (ข) รูปร่างของหัวฉีดของ Meena และคณะ [15]

ในปี ค.ศ. 2016 Trinh และคณะ [16] ศึกษาอิทธิพลของลักษณะรูปร่างของหัวฉีดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทดลองโดยใช้เจ็ทอากาศพุงชน การทดลองมีหัวฉีดออริฟิสกลม และหัวฉีดออริฟิสสี่แฉก หัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลประมาณ 14 mm มีขนาดพื้นที่เจ็ทอิสระเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 16 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=23,000$ ถึง $45,000$) ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=1$ ถึง 5) ผลการทดลองพบว่าหัวฉีดกลมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดออริฟิสสี่แฉก และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส

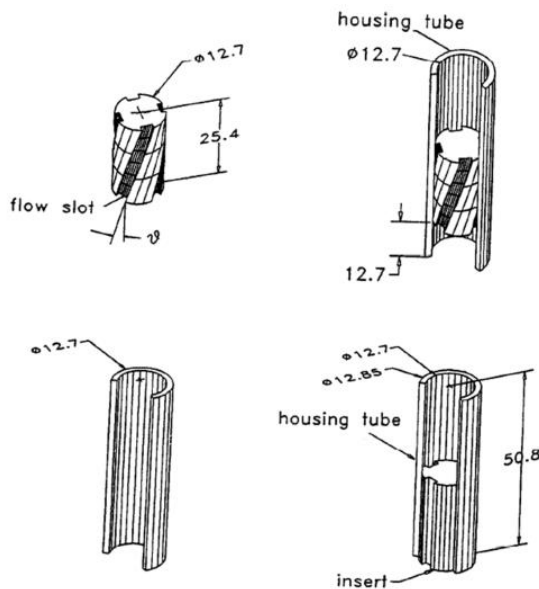


รูปที่ 16 หัวฉีด (ก) หัวฉีดออริฟิสกลม : (ข) หัวฉีดออริฟิสสี่แฉกของ Trinh และคณะ [16]

3. เจ็ทหมุนควง

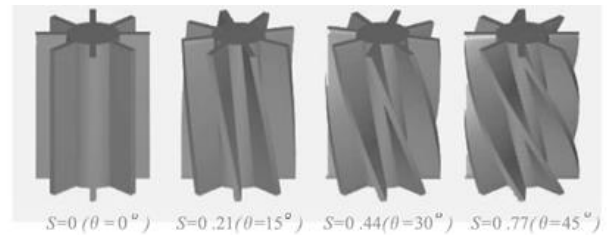
ในปี ค.ศ. 1998 Huang และ El-Genk [17] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทหมุนควงพุงชน ครั้งนี้ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงด้วยแท่งกระบอกทรงตันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันกับหัวฉีดเปล่า แท่งทรงกระบอกมีร่องด้านข้างจำนวน 4 ร่อง และมีมุมเอียงของร่อง ($\theta=15^\circ, 30^\circ$ และ 45°) และแบบมีร่องตรง ($\theta=0^\circ$) ดังแสดงในรูปที่ 17 ทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L=12.7$ ถึง 76.2 มิลลิเมตร) ใช้อากาศเป็นของไหลทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส (Re) อยู่ในช่วง $3,620$ ถึง $88,000$ ผลการทดลองพบว่าหัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงให้

ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดเปล่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์ส์ การทดลองครั้งนี้หัวฉีดที่ติดตั้งแท่งกระบอกเอียง ($\theta=15^\circ$) ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L=50.8$ มิลลิเมตร) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับแบบอื่น ๆ และหัวฉีดเปล่า

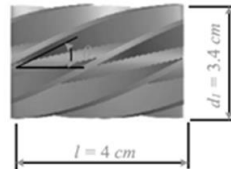


รูปที่ 17 หัวฉีดแบบหมุนควงหลายช่องการไหลของ Huang และ El-Genk [17]

ในปี ค.ศ. 2002 Lee และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบด้วยเจ็ทหมุนควงพุงชน อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงมีลักษณะทรงตันอยู่ตรงกลางและมีช่องการไหลจำนวน 8 ช่อง มีมุมเอียงของช่องการไหล ($\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ และ 45°) ดังแสดงในรูปที่ 18 ทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=2, 4, 6, 8$ และ 10) ใช้อากาศเป็นของไหลทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ ($Re=23,000$) ผลการทดลองพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนของหัวฉีดที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดเปล่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการลดลงของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน (L/D) และหัวฉีดที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงมุมเอียง ($\theta=15^\circ$) ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=2$) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด



(ก) มุมเอียงของช่องการไหล

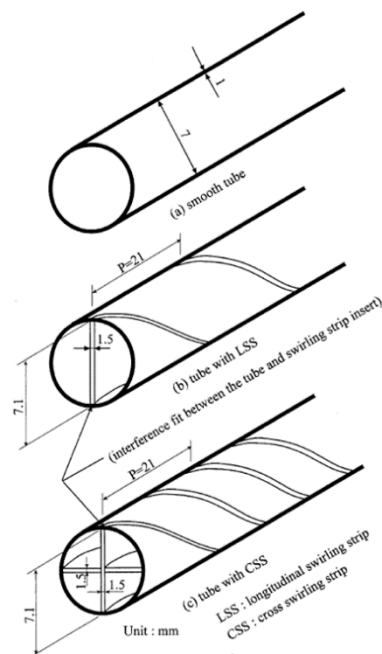


(ข) ขนาดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง



(ค) หน้าตัด

รูปที่ 18 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Lee และคณะ [18]



รูปที่ 19 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Wen และ Jang [19]

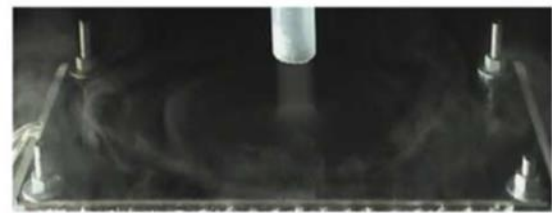
ในปี ค.ศ. 2003 Wen และ Jang [19] ได้ทำการศึกษาการระบายความร้อนบนพื้นผิวเรียบโดยใช้เจ็ทอากาศหมุนควงพุงชน ครั้งนี้ได้ใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงแบบแผ่นบิด 2 ช่องการไหล และแผ่นบิด 4 ช่องการไหล ดังแสดงในรูปที่ 19 ทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=3$ ถึง 16) ใช้อากาศเป็นของ

ไหลทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส (Re) อยู่ในช่วง 500 ถึง 27,000 ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงในหัวฉีดส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น หัวฉีดที่มีแผ่นบิด 4 ช่องการไหลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นบิด 2 ช่องการไหล และหัวฉีดเปล่า ตามลำดับ และยังพบว่า การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส

ในปี ค.ศ. 2005 Wen [20] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน การทดลองมีหัวฉีดแบบดั้งเดิม หัวฉีดใส่แผ่นบิด 2 ช่องการไหล และหัวฉีดใส่แผ่นบิด 4 ช่องการไหล ดังแสดงในรูปที่ 20 เลขเรย์โนลด์สอยู่ระหว่าง 440 และ 27,000 และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($L/D=3$ ถึง 16) ความถี่การสั่น $f=0.3-10.19$ Hz วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีฟลักซ์ความร้อนพื้นผิวคงที่ และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการแสดงภาพการไหลของควัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสั่นช่วยให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า ในส่วนการทดลองโครงสร้างการไหลพบว่า หัวฉีดใส่แผ่นบิด 4 ช่องการไหลทำให้กระแสน้ำไหลของเจ็ทกระจายตัวได้ดีกว่าหัวฉีดใส่แผ่นบิด 2 ช่องการไหล และหัวฉีดแบบดั้งเดิม

ในปี ค.ศ. 2005 Senda และคณะ [21] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทหมุนควงที่มีระดับการหมุนควง $Sw=0.0$, 0.22 และ 0.45 ดังแสดงในรูปที่ 21 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=8100$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($H/D=1, 2, 4$ และ 6) ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนน้อย ($H/D=1$) เจ็ทหมุนควงที่มีระดับการหมุนควง $Sw=0.45$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดในทางตรงข้ามให้ค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยลงเมื่อระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2006 Yuan และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการไหลหมุนควงต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบ ครั้งนี้ได้ใช้แผ่นบิดแบบดั้งเดิมสองช่องการไหลที่มีอัตราส่วนการบิดเท่ากับ 5 ได้แสดงในรูปที่ 22 ทำการทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($L/D=3$) ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นของไหลทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส (Re) อยู่ในช่วง 7500 ถึง 28,300 พบว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงสูงกว่าเจ็ทธรรมดา และการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์ส



(ก)

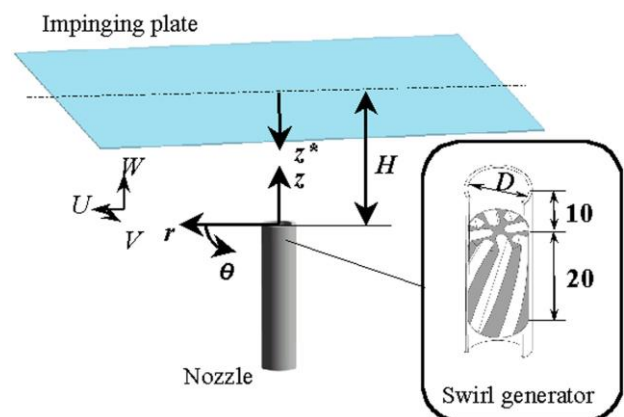


(ข)

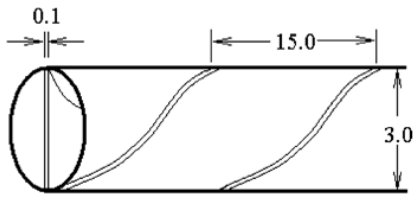


(ค)

รูปที่ 20 โครงสร้างการไหลหมุนควง (ก) หัวฉีดแบบดั้งเดิม (ข) หัวฉีดใส่แผ่นบิด 2 ช่องการไหล (ค) หัวฉีดใส่แผ่นบิด 4 ช่องการไหล ของ Wen [20]

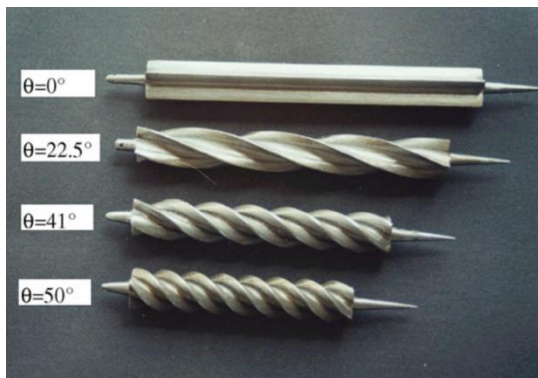


รูปที่ 21 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Senda และคณะ [21]



รูปที่ 22 โครงสร้างและขนาดของหัวฉีดยิ่งที่ใช้ทดลองของ Yuan และคณะ [22]

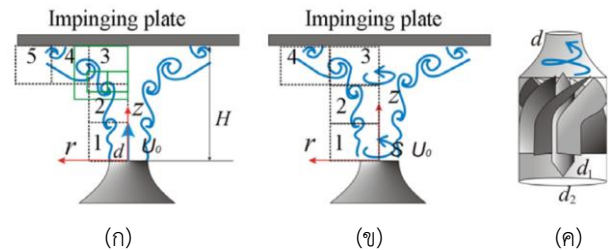
ในปี ค.ศ. 2007 Bakirci และ Bilen [23] ได้ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทหมุนควงหลายช่องการไหลพุ่งชน วัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยเทคนิคเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงมีมุมเอียงหมุนควงตามแนวแกน θ เท่ากับ 0° , 22.5° , 41° และ 50° มีจำนวน 4 ช่องการไหล ดังแสดงในรูปที่ 23 เลขเรย์โนลด์สอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 30,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($6 < L/D < 14$) ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์สและการเพิ่มมุมเอียงหมุนควงตามแนวแกน การทดลองครั้งนี้พบว่าหัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์ที่มุมเอียงหมุนควงตามแนวแกน $\theta=50^\circ$ และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=14$ ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด



รูปที่ 23 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่มีมุมต่างกันของ Bakirci และ Bilen [23]

ในปี ค.ศ. 2007 Alekseenko และคณะ [24] ได้ศึกษาลักษณะของเจ็ทหมุนควงพุ่งชนด้วยเทคนิค PIV และ Stereo PIV

เทคนิค โดยทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส $Re=89,000$ ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=3$ และอัตราการหมุนควง s แตกต่างกันจาก 0 ถึง 10 อุปกรณ์ที่ได้ทดลองครั้งนี้ได้แสดงในรูปที่ 24 ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าหัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนมากขึ้น และมีหน้าตัดของลำเจ็ทมากกว่าหัวฉีดแบบดั้งเดิม

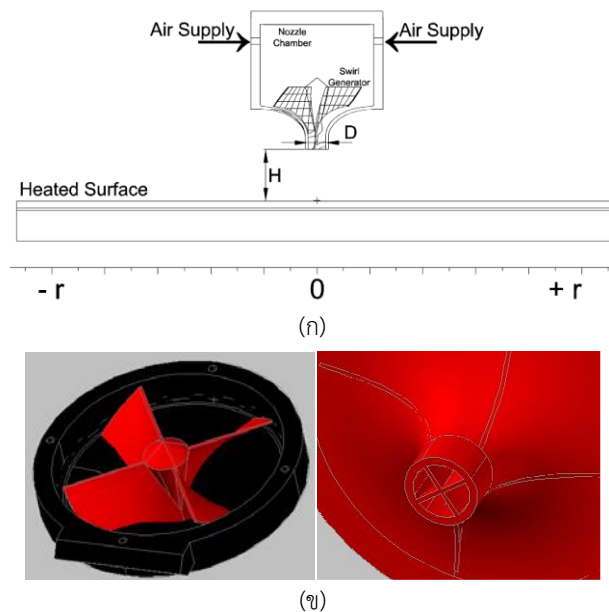


รูปที่ 24 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง (ก) เจ็ทแบบดั้งเดิม (ข) เจ็ทหมุนควง (ค) การจัดเรียงใบพัดของ Alekseenko และคณะ [24]

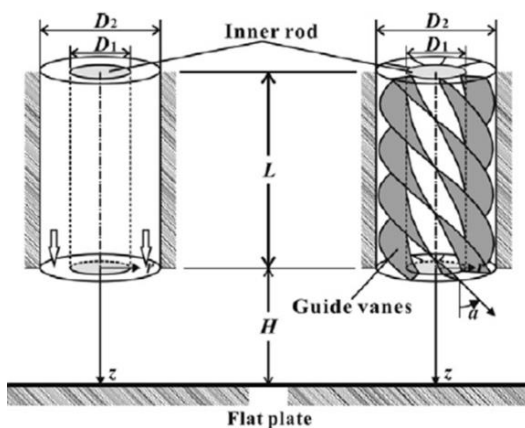
ในปี ค.ศ. 2008 Kinsella และคณะ [25] ได้ออกแบบหัวฉีดเจ็ทหมุนควงเพื่อเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อน หัวฉีดติดตั้งใบพัด 4 ใบ หรือจำนวน 4 ช่องการไหล ที่ระดับการหมุนควง ($S=0$ ถึง 2.25) ดังแสดงในรูปที่ 25 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=10,000$ ถึง 30,000) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($H/D=0.5$ ถึง 6.0) ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าหัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ในทางกลับกันการทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนน้อย ($H/D=0.5$ และ 3.0) เจ็ทหมุนควงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนบริเวณศูนย์กลางต่ำลง อันเนื่องมาจากการตัดกันของใบพัดกลางหัวฉีด

ในปี ค.ศ. 2010 Yang และคณะ [26] ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยหัวฉีดแบบวงแหวนที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงและแบบไม่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง หัวฉีดทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในต่อหัวฉีดด้านนอกเท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 26 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนเท่ากับ 0.5, 2.1 และ 4.1 ใช้อากาศเป็นของไหลทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส 7000 ผลการทดลองพบว่าเจ็ทแบบวงแหวนที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบไม่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงและแบบดั้งเดิม และยังพบว่า

เจ็ทแบบวงแหวนที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงมีการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมากกว่า



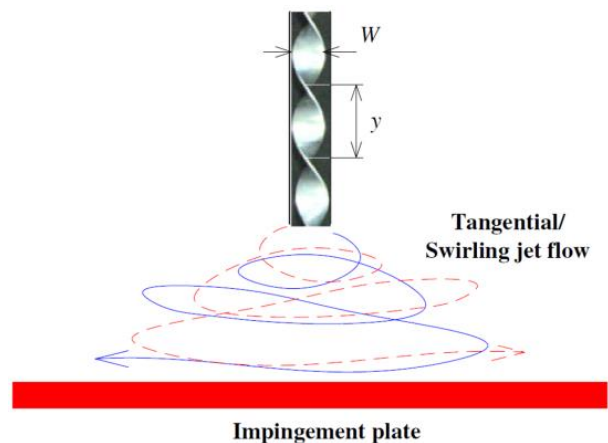
รูปที่ 25 เจ็ทหมุนควงพุ่งชน (ก) ชุดทดลอง : (ข) อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Kinsella และคณะ [25]



รูปที่ 26 หัวฉีดแบบวงแหวนที่มีและไม่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Yang และคณะ [26]

ในปี ค.ศ. 2012 Nanan และคณะ [27] ได้ดำเนินการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบด้วยเจ็ทหมุนควงพุ่งชน ได้ติดตั้ง

แผ่นปิดในหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 27 ครั้งนี้มีการทดลองหลายอัตราส่วนหมุนควง อัตราส่วนการปิด ($y/W=3, 4, 5$ และ 6) ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=2, 4, 6$ และ 8 เลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในช่วงระหว่าง 4000 และ 16,000 ผลการทดลองพบว่าเจ็ทหมุนควงพุ่งชนที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=2$ และ 4 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดแบบดั้งเดิม แต่ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=6$ และ 8 ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า

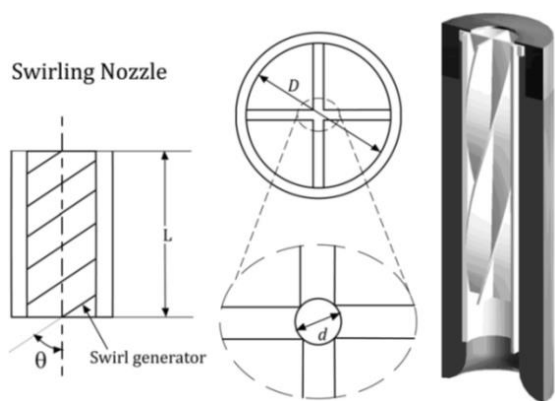


รูปที่ 27 หัวฉีดที่ใส่แผ่นปิดเพื่อสร้างการไหลหมุนควงของ Nanan และคณะ [27]

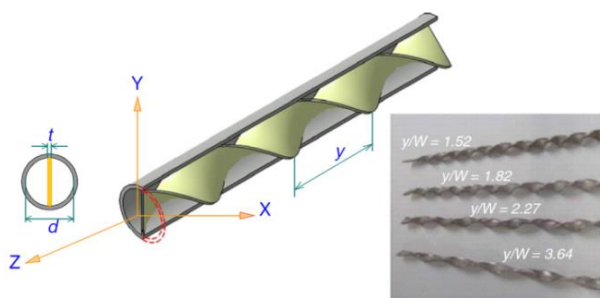
ในปี ค.ศ. 2012 Ianiro และ Cardone [28] ได้ดำเนินการศึกษาระดับการหมุนควงของเจ็ทอากาศพุ่งชนส่งผลต่อการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงมีจำนวน 4 ช่องการไหล มี 5 ระดับการหมุนควง (0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8) ดังแสดงในรูปที่ 28 เลขเรย์โนลด์ส์เท่ากับ 28,000 และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน $L/D=2, 4, 6, 8$ และ 10 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดแบบดั้งเดิม และอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มระดับการไหลหมุนควง และยังพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทอากาศหมุนควงมีค่าสูงที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนน้อย

ในปี ค.ศ. 2012 Nuntadusit และคณะ [29] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทหมุนควงพุ่งชน ระยะ

ทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $L/d=4$ ครั้งนี้สร้างการไหลหมุนควงด้วยการติดตั้งแผ่นบิดเข้าไปในหัวฉีด อิทธิพลของการหมุนควงบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนการบิด ($y/W=3.64, 2.27, 1.82$ และ 1.52) ดังแสดงในรูปที่ 29 ใช้อากาศเป็นของไหลที่เลขเรย์โนลด์ส $Re=20,000$ และใช้เทคนิคเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตัลในการวัดการกระจายการถ่ายเทความร้อน ผลการทดลองพบว่าหัวฉีดที่ติดตั้งแผ่นบิด $y/W=3.64$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนการบิด



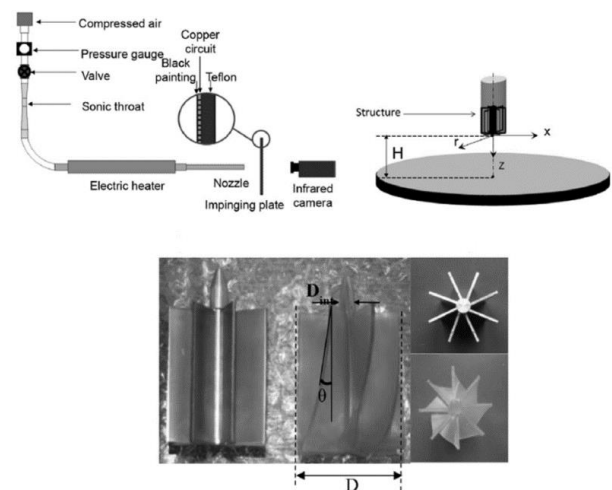
รูปที่ 28 หัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Ianiro และ Cardone [28]



รูปที่ 29 หัวฉีดติดตั้งแผ่นบิดของ Nuntadusit และคณะ [29]

ในปี ค.ศ. 2015 Fénot และคณะ [30] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุงชนหลายช่องการไหล ทำการทดลอง 3 ลักษณะ ดังเช่น หัวฉีดแบบดั้งเดิม หัวฉีดแบบติดตั้งใบพัดแบบตรงหลายช่องการไหล ($S_w=0$) และหัวฉีดแบบติดตั้งใบพัด

แบบเอียงหลายช่องการไหล ($S_w=0.26$) ดังแสดงในรูปที่ 30 เลขเรย์โนลด์สจาก 23,000 ถึง 33,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนเท่ากับ $H/D=1$ ถึง 6 ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส และที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยผลการของหัวฉีดแบบติดตั้งใบพัดแบบตรงและแบบติดตั้งใบพัดแบบเอียงช่วยเพิ่มค่าเลขนัสเซลล์เมื่อเปรียบเทียบกับหัวฉีดแบบดั้งเดิม

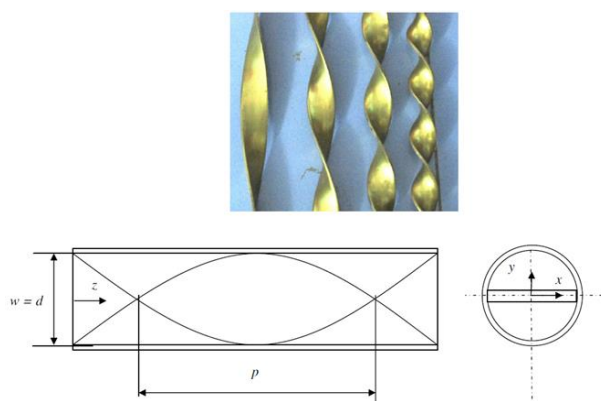


รูปที่ 30 หัวฉีดที่ติดตั้งใบพัดแบบตรงและแบบเอียงของ Fénot และคณะ [30]

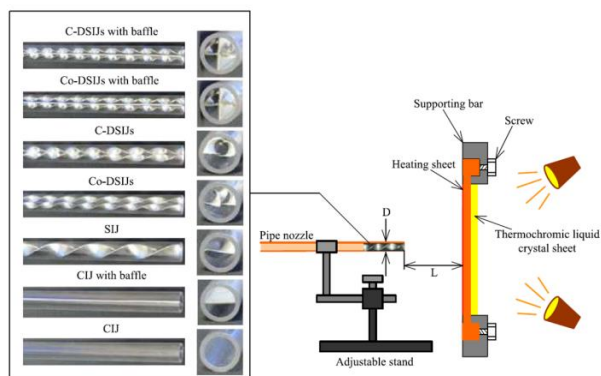
ในปี ค.ศ. 2015 Hindasageri และคณะ [31] ได้ทำการศึกษากการกระจายการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทเปลวไฟหมุนควงพุงชนพื้นผิว หัวฉีดติดตั้งแผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิด ($TR=2, 3.2, 4.5$ และ 7.5) ดังแสดงในรูปที่ 31 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส ($Re=500$ ถึง 5000) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/d=2$ และ 4) ผลการทดลองพบว่าหัวฉีดที่ติดตั้งแผ่นช่วยให้เพิ่มการกระจายฟลักซ์ความร้อนได้ที่เลขเรย์โนลด์สต่ำ และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อย เมื่อเลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจายฟลักซ์ความร้อนมีค่าลดลง

ในปี ค.ศ. 2015 Eiamsa-ard และคณะ [32] ได้ทำการศึกษากการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทอากาศหมุนควงพุงชน ได้มีการติดตั้งแผ่นบิดลักษณะต่าง ๆ ในหัวฉีด ดังเช่น แผ่นบิดเดี่ยว แผ่นบิดคู่แบบตาม แผ่นบิดคู่แบบทวน และแผ่นบิดคู่แบบตามและแบบ

ทวนที่มีแผ่นกั้น และอัตราการหมุนควง $y/W=3, 4, 5$ และ 6 ดังแสดงในรูปที่ 32 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ 5000, 1,0000, 15,000 และ 20,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $L/D=1, 2, 4, 6$ และ 8 วัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยเทคนิคเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์ และหัวฉีดที่ติดตั้งแผ่นบิตลักษณะต่าง ๆ เพื่อสร้างการไหลหมุนควงให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าหัวฉีดแบบดั้งเดิมที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อย

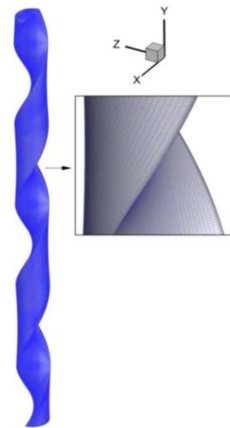


รูปที่ 31 หัวฉีดที่ติดตั้งแผ่นบิตเพื่อสร้างการไหลหมุนควงของ Hindasageri และคณะ [31]

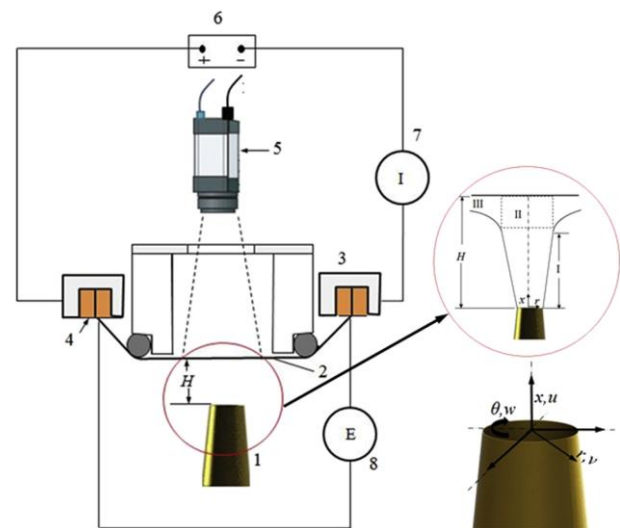


รูปที่ 32 หัวฉีดที่ติดตั้งแผ่นบิตเพื่อสร้างการไหลหมุนควงของ Eiamsa-ard และคณะ [32]

ในปี ค.ศ. 2015 Amini และคณะ [33] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทหมุนควงพุงชน ใช้เทคนิค CFD ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง หัวฉีดที่มีแผ่นบิตอัตราส่วนการบิต ($y/w=3, 4, 5$ และ 6) ดังแสดงในรูปที่ 33 ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ ($Re=4000, 8000, 12,000$ และ $16,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=2, 4, 6$ และ 8) ผลการทดลองเผยให้เห็นว่าหัวฉีดที่มีแผ่นบิตให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนการบิต (y/w) การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเลขเรย์โนลด์ส์



รูปที่ 33 หัวฉีดที่มีแผ่นบิตของ Amini และคณะ [33]



รูปที่ 34 ชุดทดลองสำหรับการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนของ Ahmed และคณะ [34]

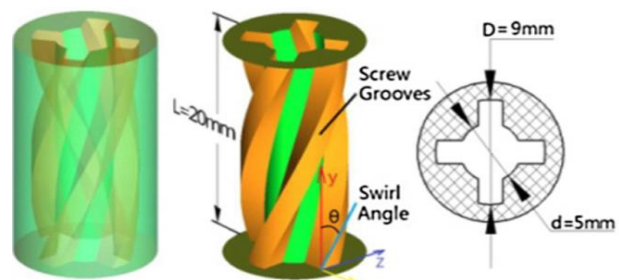
ในปี ค.ศ. 2017 Ahmed และคณะ [34] ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุงชนทั้งเจ็ทแบบดั้งเดิมและเจ็ทหมุนควง เจ็ทแบบดั้งเดิม ($s=0$) และเจ็ทหมุนควง ($s=0.27, 0.45, 0.77$ และ 1.05) ดังแสดงในรูปที่ 34 การทดลองอยู่ในช่วงการไหลปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลด์ส์ ($Re=35,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($H=2D$ และ $6D$) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน การทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อย ($H=2D$) พบว่าเจ็ทหมุนควงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิม และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มระดับหมุนควง (s) ในทางกลับกันการทดลองที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนมาก ($H=6D$) เจ็ทแบบดั้งเดิมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเจ็ทหมุนควง

Kumar และคณะ [35] ได้ทำการศึกษากการกระจายการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่บนพื้นผิวด้วยเจ็ทหมุนควงพุงชน สร้างการไหลแบบหมุนควงด้วยการติดตั้งแผ่นบิดในหัวฉีดที่มีอัตราส่วนการบิด 2, 3.2, 4.5 และ 7.5 หรือระดับการหมุนควงเท่ากับ 0.79, 0.49, 0.35, 0.21 ดังแสดงในรูปที่ 35 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ 500 ถึง 3000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน 1 ถึง 4 การทดลองครั้งนี้ใช้กล้องอินฟราเรดวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ผลการทดลองพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราการบิดหรือการลดระดับการหมุนควง และยังพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนเท่ากับ 1



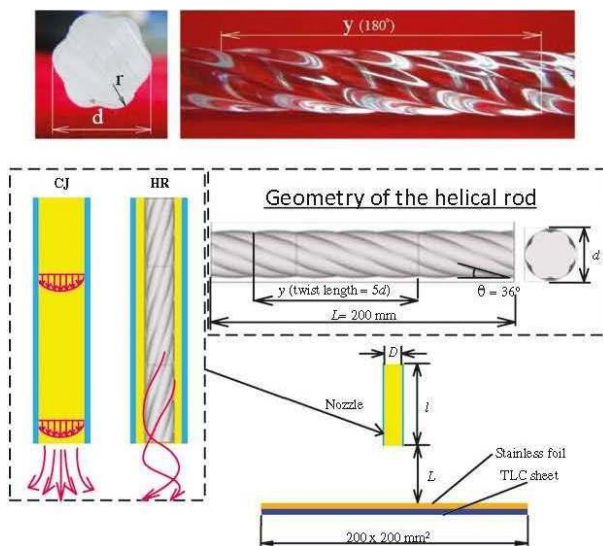
รูปที่ 35 แผ่นบิดเพื่อสร้างการไหลหมุนควงของ Kumar และคณะ [35]

ในปี ค.ศ. 2017 Xu และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทหมุนควงพุงชน ได้มีการออกแบบหัวฉีดเพื่อสร้างการไหลหมุนควงให้มีลักษณะเป็นสกรูเกลียว 4 ร่อง มีมุมเอียงของร่องตามแนวแกน 15° ถึง 75° ดังแสดงในรูปที่ 36 ทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์อยู่ในช่วงระหว่าง 4000 และ 12,000 ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน 1 ถึง 8 ผลการทดลองเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์ และการลดลงของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ให้โดยหัวฉีดสกรูเกลียวสูงกว่าหัวฉีดแบบดั้งเดิม และมีความค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่มุมเอียงของร่องตามแนวแกน 60° ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยกว่า 3



รูปที่ 36 หัวฉีดแบบสกรูเกลียวของ Xu และคณะ [36]

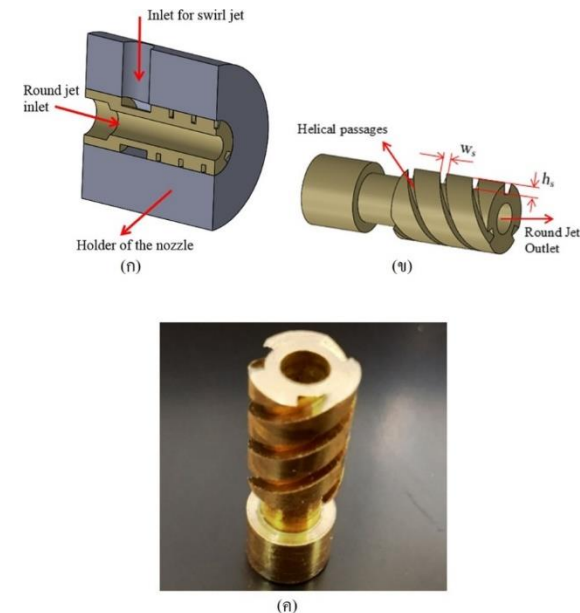
ในปี ค.ศ. 2018 Eiamsa-ard และคณะ [37] ได้ทำการศึกษากการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทหมุนควง หัวฉีดสร้างเจ็ทหมุนควงได้ติดตั้งแท่งบิดเกลียวที่ทางออกของหัวฉีด สัดส่วนขนาดของแท่งบิดเกลียวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ($d/D=0.46$ และ 0.64) ดังแสดงในรูปที่ 37 ดำเนินการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ ($Re=20,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=1$ ถึง 5) วิเคราะห์การกระจายการถ่ายเทความร้อนด้วยแผ่นเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตัล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบแท่งบิดเกลียว ($d/D=0.64$) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด สูงกว่า ($d/D=0.46$) และหัวฉีดเปล่าหรือเจ็ทแบบดั้งเดิม ตามลำดับ และยังพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน



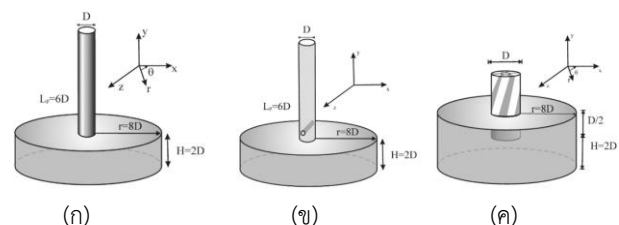
รูปที่ 37 หัวฉีดที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบแท่งบิดเกลียวของ Eiamsa-ard และคณะ [37]

ในปี ค.ศ. 2018 Markal [38] ได้ศึกษาเชิงทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทอากาศหมุนควงพุ่งชน ครั้งนี้ได้ออกแบบหัวฉีดแปลกใหม่คือมีหัวฉีดกลมและช่องหัวฉีดเจ็ทหมุนควงรอบนอก 3 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 38 ทดลองที่อัตราการไหลหัวฉีดกลม $0.00133 \text{ m}^3/\text{s}$ และสัดส่วนอัตราการไหล 0.25, 0.50 และ 0.75 และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน ($L/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ และ 2.5) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหัวฉีดกลมที่มีช่องหัวฉีดเจ็ทหมุนควงรอบนอกช่วยให้มีความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น และยังเพิ่มค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชนอย่างชัดเจน

ในปี ค.ศ. 2019 Uddin และคณะ [39] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวช่วงการไหลปั่นป่วน ทำการเปรียบเทียบหัวฉีด 3 ลักษณะ ดังเช่น หัวฉีดกลม หัวฉีดกลมที่มีแท่งทรงกระบอกขวางทำให้เกิดการไหลเป็นคลื่นแอมพลิจูด ความถี่และกระแสไหลวน และหัวฉีดที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง ดังแสดงในรูปที่ 39 วิเคราะห์ผลด้วย Large-Eddy Simulations ผลการ



รูปที่ 38 หัวฉีดกลมที่มีเจ็ทหมุนควงรอบนอกของ Markal [38]

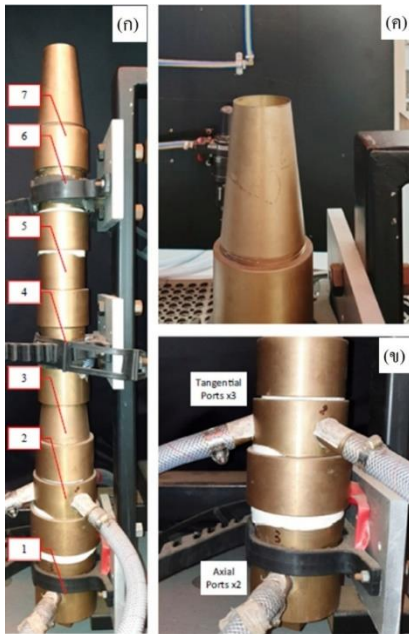


รูปที่ 39 หัวฉีด (ก) หัวฉีดกลม : (ข) หัวฉีดกลมที่มีแท่งทรงกระบอกขวาง (ค) หัวฉีดที่มีอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงของ Uddin และคณะ [39]

ทดลองครั้งนี้พบว่าการกระตุ้นด้วยแท่งทรงกระบอกช่วยให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อน แต่อาจทำให้เกิดความดันตกคร่อมสูง ในส่วนของการไหลหมุนควงช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้น้อยกว่าการกระตุ้นด้วยแท่งทรงกระบอก

ในปี ค.ศ. 2019 Ikhlaiq และคณะ [40] ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวช่วงปั่นป่วน ทั้งเจ็ทหมุนควงและเจ็ทแบบไม่หมุนควงหรือเจ็ทแบบดั้งเดิม เจ็ทหมุนควงมีระดับหมุนควง ($S=0$ ถึง 1.05) ดังแสดงในรูปที่ 40 ทดลองที่เลขเรย์โน

ลด์ส์ ($Re=11,600, 24,600$ และ $35,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=2, 4$ และ 6) ผลการทดลองพบว่าเจ็ทแบบดั้งเดิม ที่เลขเรย์โนลด์ส์สูง บริเวณที่เลขนัสเซลล์มีค่าสูงที่สุดยังคงที่ตลอด ตรงกันข้ามกับผลการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์ต่ำ ลักษณะช่วงการเปลี่ยนแปลงสำหรับระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=4$) มีความแตกต่างกับผลการทดลอง ($L/D=2$ และ 6) ในส่วนเจ็ทหมุนควงพบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนของแผ่นที่เจ็ทพุงชนบริเวณ ศูนย์กลางและบริเวณเจ็ทผนังจะมีการเปลี่ยนแปลงพัฒนาไปพร้อมกัน เลขนัสเซลล์สูงสุดจะปรากฏบริเวณเจ็ทผนังเมื่อระดับความรุนแรงของการหมุนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 40 หัวฉีด (ก) หัวฉีดเจ็ทแสดงส่วนต่าง ๆ (ข) ส่วนปลายด้านล่างของหัวฉีดที่มีพอร์ตตามแนวสัมผัสสองแกนและสามแกน (ค) ส่วนบนของหัวฉีดแสดงขอบ “knife” ของ Uddin และคณะ [40]

4. ความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ในปี ค.ศ. 1996 Colucci และ Viskanta [1] พบว่าความสม่ำเสมอของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถทำให้ผลดีขึ้นได้ด้วยการออกแบบหัวฉีดออริฟิเชียลไฮเปอร์โบลิก ซึ่งให้ความสม่ำเสมอ

ในการถ่ายเทความร้อนดีกว่าหัวฉีดออริฟิเชียลธรรมดา ในปี ค.ศ. 1998 Huang และ El-Genk [17] เจ็ทหมุนควงช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและทำให้เพิ่มความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีดีกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิม ความสม่ำเสมอมีแนวโน้มดีขึ้นตามการเพิ่มระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน และยังพบว่าเหมาะสมที่สุดสำหรับเจ็ทหมุนควง 15° ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน 50.8 มิลลิเมตร ในปี ค.ศ. 2002 Lee และคณะ [18] พบว่าเจ็ทหมุนควงช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและยังทำให้การกระจายการถ่ายเทความร้อนมีความสม่ำเสมอดีขึ้นด้วย ที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยเจ็ทหมุนควงให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยสูงกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิม ในทางกลับกันที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนมากเจ็ทหมุนควงให้ค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยต่ำกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิม แต่ให้ค่าการกระจายเลขนัสเซลล์ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนและระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้นเลขนัสเซลล์สูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะห่างออกไปให้ความสม่ำเสมอดีขึ้น ในปี ค.ศ. 2005 Wen [20] พบว่าการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนลดจากช่วงบริเวณการถ่ายเทความร้อนสูงช่วงที่สองหรือช่วงเจ็ทผนังสามารถทำได้โดยใช้เจ็ทหมุนควง การทดลองครั้งนี้พบว่าเจ็ทหมุนควงสี่ช่องการไหลให้ความสม่ำเสมอดีกว่าเจ็ทหมุนควงสองช่องการไหล และเจ็ทแบบดั้งเดิม ตามลำดับ ในปี ค.ศ. 2005 Senda และคณะ [21] ทดลองเจ็ทหมุนควงพุงชนพื้นผิว การทดลองครั้งนี้ระดับการหมุนควง $0.0, 0.22$ และ 0.45 พบว่าความสม่ำเสมอในการกระจายเลขนัสเซลล์เพิ่มขึ้นตามระดับการหมุนควง และความสม่ำเสมอในการกระจายเลขนัสเซลล์ดีที่สุดที่ระดับการหมุนควงมากที่สุด 0.45 และยังพบว่าความสม่ำเสมอในการกระจายเลขนัสเซลล์ดีขึ้นตามการเพิ่มระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ในปี ค.ศ. 2006 Yuan และคณะ [22] การทดลองอิทธิพลของเจ็ทหมุนควงส่งผลต่อการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว พบว่าเจ็ทหมุนควงช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวตามแนวรัศมีดีกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัดเจน ในปี ค.ศ. 2007 Bakirci และ Bilen [23] การทดลองแสดงให้เห็นว่าเจ็ทหมุนควงหลายช่องการไหลช่วยให้เพิ่มความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวตามแนวรัศมีดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทแบบดั้งเดิม และเจ็ทหมุนควงหลายช่องการไหล การทดลองครั้งนี้เหมาะที่สุดที่มุมหมุนควง 50° และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน $L/D=14$ นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดลองที่เลขเรย์โนลด์ส์น้อย ($Re=10,000$) และระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนมาก $L/D=14$

ตารางที่ 1 สรุปวิธีการทดลองและตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนสำหรับเจ็ทหมุนควง (ต่อ)

					laniro และ Cardone [28]	infrared camera	19.7	28,000	2.0-10.0
ผู้แต่ง	เทคนิค	D (mm)	Re	L/D					
Huang และ EL-Genk [17]	Smoke flow, smoke wires และ water jet	12.7	3620-88,000	1.0-6.0	Nuntadusit และคณะ [29]	thermo-chromic liquid crystal และ oil film technique	16.5	20,000	4.0
Lee และคณะ [18]	thermo-chromic liquid crystal	34.0	23,000	2.0-10.0	Fenot และคณะ [30]	infrared camera	56.0	23,000-33,000	1.0-6.0
Wen และ Jang [19]	Smoke flow และ thermocouples	7.0	500-27,000	3.0-16.0	Hindasageri และคณะ [31]	infrared camera	11.5	500-5000	2.0-4.0
Wen [20]	Smoke flow และ thermocouples	7.0	440-27,000	3.0-16.0	Eiamsa-ard และคณะ [32]	thermo-chromic liquid crystal	14.0	5000-20,000	1.0-8.0
Senda และคณะ [21]	thermo-chromic liquid crystal	10.0	8100	1.0-6.0	Amini และคณะ [33]	CFD technique		4000-16,000	2.0-8.0
Yuan และคณะ [22]	thermo-chromic liquid crystal	3.0	7500-28,300	3.0	Ahmed และคณะ [34]	infrared camera	40.0	35,000	2.0-6.0
Bakirci และ Bilen [23]	thermo-chromic liquid crystal	15.0	10,000-30,000	6.0-14.0	Kumar และคณะ [35]	infrared camera	12.0	500-3000	1.0-4.0
Alekseenko และคณะ [24]	PIV และ Stereo PIV	15.0	8900	3.0	Xu และคณะ [36]	numerical investigation	7.0	4000-12,000	1.0-8.0
Kinsella และคณะ [25]	thermo-chromic liquid crystal		10,000-30,000	0.5-6.0	Eiamsa-ard และคณะ [37]	thermo-chromic liquid crystal	16.0	20,000	1.0-5.0
Yang และคณะ [26]	T-type foil thermocouple	68.0	7000	0.5-4.1	Markal [38]	thermocouples	4.5		0.5-2.5
Nanan และคณะ [27]	thermocouples	21.0	4000-16,000	2.0-8.0	Uddin และคณะ [39]	Large-Eddy Simulations		11,500-23,000	2.0
					Ikhlal และคณะ [40]	infrared camera	40.0	11,600-35,000	2.0-6.0

ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการกระจายความสม่ำเสมอบนพื้นผิวดีที่สุด ในปี ค.ศ. 2008 Kinsella และคณะ [25] การทดลองครั้งนี้ได้มีการออกแบบเจ็ทหมุนควงเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวตามแนวรัศมีมีค่าดีขึ้นตามการเพิ่มระดับการหมุนควง และการเพิ่มระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ในปี ค.ศ. 2010 Yang และคณะ [26] การทดลองครั้งนี้พบว่าระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยเจ็ทวงแหวนหมุนควงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่สม่ำเสมอบนพื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทวงแหวนแบบดั้งเดิม ในทางกลับกันระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนมากเจ็ทวงแหวนหมุนควงช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอดีกว่า ในปี ค.ศ. 2012 Ianaro และ Cardone [28] เจ็ทหมุนควงทำให้ลดอัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวตามแนวรัศมี การทดลองระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยพบว่าเจ็ทหมุนควงมีความสม่ำเสมอในการกระจายการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าเจ็ทแบบดั้งเดิม แต่การทดลองระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนมากพบว่าเจ็ทหมุนควงมีความสม่ำเสมอในการกระจายการถ่ายเทความร้อนดีกว่า ในปี ค.ศ. 2017 Kumar และคณะ [35] ทดลองการกระจายการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทหมุนควงพุงชน พบว่าหัวฉีดติดตั้งแผ่นบิตเพื่อสร้างการไหลหมุนควงช่วยให้ความสม่ำเสมอในการกระจายการถ่ายเทความร้อนดีกว่าหัวฉีดเปล่าหรือเจ็ทแบบดั้งเดิม ความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน และยังพบว่าหัวฉีดที่ติดตั้งแผ่นบิตที่มีอัตราส่วนการปิด ($p/w=4.5$) ให้ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด Xu และคณะ [36] ผลการทดลองพบว่าเจ็ทหมุนควงทำให้เพิ่มความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีดีกว่าเจ็ทหลายช่องการไหลแบบดั้งเดิม และที่เจ็ทหมุนควงมุมเอียง 60° การทดลองในช่วงเลขเรย์โนลด์ส์ที่มีการไหลแบบปั่นป่วนและระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน ($L/D=3$) ให้ค่าความสม่ำเสมอในการกระจายเลขนัสเซลล์ตามแนวรัศมีดีที่สุด

5. สรุป

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยเจ็ทพุงชนรูปแบบต่างๆ และได้มีการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ลักษณะรูปร่างของหัวฉีด หัวฉีดสร้างการไหลหมุนควง ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชน อัตราการไหลในรูปของเลขเรย์โนลด์ส์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทแบบดั้งเดิมและเจ็ทที่มีหน้าตัดไม่กลม ผลการทดลองพบว่าช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับการออกแบบหน้าตัดที่ช่วยให้เกิดการกระจายการถ่ายเทความร้อน การทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทที่มีการอุปกรณ์บริเวณปลายของหัวฉีดเพื่อให้เกิดรูปร่างของกระแสการไหลแบบใหม่ ทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนที่รุนแรงมากขึ้นส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น การทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทหมุนควงพุงชน ผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีตแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ดังเช่น จำนวนของการใส่อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงหรือจำนวนช่องการไหล เมื่อจำนวนช่องการไหลเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามเช่นกัน และมุมเอียงของช่องการไหลหมุนควงตามแนวแกนของหัวฉีด เมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนด้วย อาจกล่าวได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นที่ระยะทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุงชนน้อยและการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.W. Colucci and R. Viskanta, "Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 13, pp. 71-80, 1996.
- [2] S. Ashforth-Frost, K. Jambunathan and C.F. Whitney, "Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, pp. 60-67, 1997.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] N. Gao, H. Sun and D. Ewing, "Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 46, pp. 2557-2569, 2003.
- [7] D.W. Zhou and S.J. Lee, "Heat transfer enhancement of impinging jets using mesh screens", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 47, pp. 2097-2108, 2004.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] R.H. Martin and J.M. Buchlin, "Jet impingement heat transfer from lobed nozzles", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1199-1206, 2011.
- [12] H.S. Zhen, C.W. Leung and C.S. Cheung, "Heat transfer characteristics of an impinging premixed annular flame jet", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 36, pp. 386-392, 2012.
- [13] 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.
- [14] R. Vinze, S. Chandel, M.D. Limaye and S.V. Prabhu, "Local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging incompressible air jet from a chevron nozzle", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 78, pp. 124-136, 2016.
- [15] H.C. Meena, S.A. Reodikar, R. Vinze and S.V. Prabhu, "Influence of the shape of the orifice on the local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging incompressible air jet", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 70, pp. 292-306, 2016.
- [16] X.T. Trinh, M. F  not and E. Dorignac, "The effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to unconfined impinging air jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 70, pp. 1-16, 2016.
- [17] L. Huang and M. S. El-Genk, "Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 583-600, 1998.
- [18] D.H. Lee, S.E. Won, Y.T. Kim and Y.S. Chung, "Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 223-227, 2002.
- [19] M.Y. Wen and K.J. Jang, "An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 4657-4667, 2003.
- [20] M.Y. Wen, "Flow structures and heat transfer of swirling jet impinging on a flat surface with micro-vibrations", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 545-560, 2005.
- [21] M. Senda, K. Inaoka, D. Toyoda, and S. Sato, "Heat transfer and fluid flow characteristics in a swirling impinging jet", *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 34, pp. 324-335, 2005.
- [22] Z.X. Yuan, Y.Y. Chen, J.G. Jiang, C.F. Ma, "Swirling effect of jet impingement on heat transfer from a flat surface to CO₂ stream", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, pp. 55-60, 2006.
- [23] K. Bakirci and K. Bilen, "Visualization of heat transfer for impinging swirl flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 182-191, 2007.
- [24] S.V. Alekseenko, A.V. Bilsky, V.M. Dulin, D.M. Markovich, "Experimental study of an impinging jet with different swirl rates", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1340-1359, 2007.
- [25] C. Kinsella, B. Donnelly, T.S. O'Donovan and D. B. Murray, "Heat transfer enhancement from a horizontal surface by impinging swirling jets", 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, 2008.
- [26] H.Q. Yang, T. Kim, T.J. Lu, and K. Ichimiya, "Flow structure, wall pressure and heat transfer characteristics of impinging annular jet with/without steady swirling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4092-4100, 2010.
- [27] K. Nanan, K. Wongcharee, C. Nuntadusit and S. Eiamsa-ard, "Forced convective heat transfer by swirling impinging jets issuing from nozzles equipped with twisted tapes", *International Communications in Heat and Mass Transfer* Vol. 39, pp. 844-852, 2012.
- [28] A. Ianiro and G. Cardone, "Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 49, pp. 89-98, 2012.
- [29] C. Nuntadusit, M. Wae-hayee, A. Bunyajitradulya and S. Eiamsa-ard, "Visualization of flow and heat transfer characteristics for swirling impinging jet" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 640-648, 2012.
- [30] M. F  not, E. Dorignac, and G. Lalizel, "Heat transfer and flow structure of a multichannel impinging jet", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 90, pp. 323-338, 2015.
- [31] V. Hindasageri, R.P. Vedula and S.V. Prabhu, "Heat transfer distribution of swirling flame jet impinging on a flat plate using twisted tapes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, pp. 1128-1139, 2015.
- [32] S. Eiamsa-ard, K. Nanan and K. Wongcharee, Heat transfer visualization of co/counter-dual swirling impinging jets by thermochromic liquid crystal method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 86, pp. 600-621, 2015.
- [33] Y. Amini, M. Mokhtari, M. Haghshenasfard and M.B. Gerdroodbary, "Heat transfer of swirling impinging jets ejected from nozzles with twisted tapes utilizing CFD technique", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 6, pp. 104-115, 2015.
- [34] Z.U. Ahmed, Y.M. Al-Abdeli and F.G. Guzzomi, "Flow field and thermal behaviour in swirling and non-swirling turbulent impinging jets", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 114, pp. 241-256, 2017.
- [35] S.S. Kumar, V. Hindasageri and S.V. Prabhu, "Local heat transfer distribution on a flat plate impinged by a swirling jet generated by a twisted tape", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 111 pp. 351-368, 2017.
- [36] L. Xu, J. Lan, Y. Ma, J. Gao and Y. Li, "Numerical study on heat transfer by swirling impinging jets issuing from a screw-thread nozzle", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115 pp. 232-237, 2017.
- [37] S. Eiamsa-ard, C. Nuntadusit, K. Wongcharee and V. Chuwattanakul, "An impingement cooling using swirling jets induced by helical rod swirl generators", *International Journal of Turbo and Jet Engines*, Vol. 35, pp. 241-250, 2018.
- [38] B. Markal, "Experimental investigation of heat transfer characteristics and wall pressure distribution of swirling coaxial confined impinging air jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, pp. 517-532, 2018.
- [39] N. Uddin, B. Weigand and B.A. Younis, "Comparative study on heat transfer enhancement by turbulent impinging jet under conditions of swirl, active excitations and passive excitations", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 100, pp. 35-41, 2019.
- [40] M. Ikhl  aq, Y.M. Al-Abdeli and M. Khiadani, "Transient heat transfer characteristics of swirling and non-swirling turbulent

impinging jets”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 109, 109917, 2019.



ดร. เก่งกล้า กุลรักษ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ระดับปริญญาโทและเอก สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจงานวิจัยในเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน งานทางด้านของไหลและความร้อน และเจ็ทพุงชน



ของไหลและความร้อน และเจ็ทพุงชน

ผศ.ดร. ขวัญชัย หนาแน่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี มีความสนใจงานวิจัยในเรื่องการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน งานทางด้าน



เอกวิศวกรรมเครื่องกล จาก University of Victoria ประเทศแคนาดา ปัจจุบันเป็นผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

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



งานด้านเทคนิค visualization ต่าง ๆ สำหรับศึกษาพฤติกรรมการไหลและความร้อน

รศ.ดร. สมิต์ เอี่ยมสอาด สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมเครื่องกลจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจงานวิจัยในเรื่องเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควง งานทางด้านของไหลและความร้อน และ