MRG4980085 ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิต

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้เจ็ทหมุนควงในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

(Heat Transfer Enhancement on a Surface Using Some Swirling Jets)

โดย ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิต และคณะ

สิงหาคม 2553

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ตามโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษากับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร. อศิ บุญจิตราดุลย์ นักวิจัยที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาชี้แนะในระหว่างการทำวิจัย ขอขอบคุณ นายมักตาร์ แวหะยี ผู้ช่วยวิจัยที่ทำงานหนักจนทำโครงการวิจัยนี้สำเร็จได้ ขอขอบคุณ คุณนิยม พรหมรัตน์ ที่ช่วยสร้างชุดทดลองให้สมบูรณ์ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการดำเนินโครงการวิจัย สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานที่สนับสนุนทุนวิจัยทั้งสอง ที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถเริ่มต้นทำงานวิจัยภายในประเทศได้

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG4980085
ชื่อโครงการ : การใช้เจ็ทหมุนควงในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว
ชื่อนักวิจัย : ผศ.ดร.ชยุต นันทดุสิต
และสถาบัน : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
E-mail Address : chayut@me.psu.ac.th
ระยะเวลาโครงการ : 15 พฤษภาคม 2549 ถึง 14 พฤษภาคม 2551

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของระดับการหมุนควงของเจ็ทที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มของเจ็ทพุ่งชน ในการทดลองได้ใช้หัวฉีดแบบท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน D=16.5 mm และใช้แผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิดต่างๆสอดในท่อเจ็ทเพื่อสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง สำหรับการทดลองได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ใช้เจ็ทลำเดียวและกรณีที่ใช้กลุ่มของเจ็ท จำนวน 9 ท่อ ที่จัดเรียงในแนวเดียวกันเป็น 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ สำหรับเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, 8D และ 10D ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D, 4D, 6D, และ 8D สเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.00, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94 และเจ็ทจากท่อเปล่า โดยในแต่ละการทดลองกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทคงที่เท่ากับ Re=20,000 สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลวัดการกระจายของอุณหภูมิและหาการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน นอกจากนี้ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลโดยใช้วิธีฉีดสีผสมในเจ็ทน้ำ เพื่อดูโครงสร้างการไหลของเจ็ทหมุนควงและอธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชน

จากผลการศึกษาพบว่า เจ็ทหมุนควงที่ไหลออกจากท่อสอดแผ่นบิดจะแบ่งกระแสการไหลออกเป็นสองลำไหลเอียงทำมุมกับแกนของเจ็ท การเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทจะมีผลทำให้มุมของกระแสทั้งสองลำที่ไหลทำมุมกับแนวแกนของเจ็ทเพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่กระจายของเจ็ทและการผสมกันระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆเพิ่มขึ้น และเมื่อเจ็ทหมุนควงไหลพุ่งชนพื้นผิวแล้ว จะทำให้เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และพบว่าเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.40 สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงได้ โดยเฉพาะระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D แต่การเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทและระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะมีผลทำให้อัตราการ

ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า

สำหรับในกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวพบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อเปล่าสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้ เฉพาะกรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.40 ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D, 4D เท่านั้น แต่ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเพิ่มขึ้นเป็น S=6D, 8D เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เฉพาะบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น และในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้นเป็น L=6D, 8D และ 10D หรือในกรณีที่เพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทเป็น Sw=0.62, 0.78, 0.94 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงจะลดลง และมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า เนื่องจากเกิดการผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กันก่อนพุ่งชนพื้นผิว

คำหลัก : เจ็ทหมุนควง เจ็ทพุ่งชน การถ่ายเทความร้อน เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล

ABSTRACT

Project Code : MRG4980085

Project Title : Heat Transfer Enhancement on a Surface Using Some Swirling Jets

Investigator : Asst. Prof. Dr. Chayut Nuntadusit

E-mail Address : chayut@me.psu.ac.th

Project Period : 15 May 2006 – 14 May 2008

This research focused on the effect of swirl intensity to heat transfer rate on jets impinged wall. The research was aimed to increase heat transfer rate and to improve uniformity of heat transfer distribution on an impinged wall by array of impinging swirling jets. In the experiment, a pipe nozzle with 16.5 mm of inside diameter was used. The swirling jets at different swirl intensity were generated by inserting a twisted tape which has different twist ratio in the pipe nozzle. The flow and heat transfer characteristics on impinged wall were studied for single jet and in-line arrangement of 3x3 of multiple jets impinging perpendicularly onto the wall. The experimental parameters were the distance from nozzle exit to impinged wall L=2D, 4D, 6D, 8D and 10D, jet-to-jet distance S=2D, 4D, 6D and 8D, Swirl number Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94 and conventional jet. All of the experiments were carried out at constant jet Reynolds number of 20,000. For heat transfer measurement, temperature distributions on impinged surface were measured using temperature sensitive liquid crystal (TLC) sheet and the distributions of convective heat transfer coefficient were analyzed with image processing technique. Flow patterns on the impinged surface were visualized using Oil film technique. In addition, the flow structures in swirling jet were investigated by dye injection method in water jet and were used to explain heat transfer mechanism on jet impinged surface.

The results show that the swirling jet from pipe nozzle with twisted tape is divided into two streams which flow obliquely to the jet axis at nozzle exit. When increase the Swirl number of jet, the angle between jet stream and jet axis at nozzle exit increases. These result in higher jet spreading rate and stronger mixing of jet with ambient fluid. And when the swirling jet impinges on a wall, two regions of maximum heat transfer rate appear near the stagnation point on impinged surface. This differs from non-swirl jet which the maximum heat transfer rate appears at stagnation point. In addition, the swirling jet for Sw=0.40 can increase heat transfer rate in stagnation region, particularly for the distance from nozzle exit to impinged surface L=2D and 4D, but when the Swirl number of jet and distance from nozzle exit to impinged wall becomes

larger, the heat transfer rate in jet impingement region decreases and the heat transfer pattern becomes complex when compare with the case of jet from conventional nozzle.

In the case of array of swirling impinging jets, using swirling jet instead of conventional jet, heat transfer rate increases and the uniformity of heat transfer on impinged surface improves particularly for the case of Sw=0.40, distance from nozzle exit to impinged surface L=2D and 4D, jet-to-jet distance S=2D and 4D. However, when increasing jet-to-jet distance to S=6D, 8D, swirling jets increases the rate of heat transfer only in each of jet impingement regions. And distance from nozzle exit to impinged surface is increased (L=6D, 8D and 10D) or Swirl number of jet is increased (Sw=0.62, 0.78 and 0.94), it is found that the heat transfer rate decreases and the heat transfer patterns become complex when compared with the case of conventional jets, because there is a mixing between adjacent swirling jets before impinging on surface.

Keywords : Swirling jet, Impinging jet, Heat transfer and Thermochromic liquid crystal

Executive Summary

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยวิธีการเพิ่มการหมุนควงของเจ็ทด้วยวิธีการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท ในงานวิจัยได้ศึกษาผลของระดับการหมุนควงที่มีต่อการไหลของเจ็ทอิสระ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ใช้เจ็ทลำเดียวพุ่งชนและกรณีที่ใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

วิธีการศึกษาการไหลของเจ็ทอิสระได้ใช้วิธีฉีดสีผสมในเจ็ทน้ำ เพื่อดูโครงสร้างการไหลของเจ็ทหมุนควงแบบอิสระและแบบพุ่งชนพื้นผิว สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่มีคุณสมบัติแสดงสีตามอุณหภูมิดูลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และได้พัฒนาโปรแกรมที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพสำหรับวัดการกระจายของอุณหภูมิและหาการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน

จากผลการศึกษาพบว่า เจ็ทหมุนควงที่ไหลออกจากท่อสอดแผ่นบิดจะแบ่งกระแสการไหลออกเป็นสองลำไหลเอียงทำมุมกับแกนของเจ็ท การเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทจะมีผลทำให้มุมของกระแสทั้งสองลำที่ไหลทำมุมกับแนวแกนของเจ็ทเพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่กระจายของเจ็ทและการผสมกันระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆเพิ่มขึ้น และเมื่อเจ็ทหมุนควงไหลพุ่งชนพื้นผิวแล้ว จะทำให้เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และพบว่าเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.40 สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงได้ โดยเฉพาะระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D แต่การเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทและระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า

สำหรับในกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวพบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อเปล่าสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้ เฉพาะกรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.40 ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D, 4D เท่านั้น แต่ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเพิ่มขึ้นเป็น S=6D, 8D เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้เฉพาะบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น และในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้นเป็น L=6D, 8D และ 10D หรือในกรณีที่เพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทเป็น Sw=0.62, 0.78, 0.94 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงจะลดลง และมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า เนื่องจากเกิดการผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กันก่อนพุ่งชนพื้นผิว

ผลการศึกษาในโครงการนี้ได้ถูกนำเสนอเป็นบทความในงานประชุมวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ รวมทั้งหมด 9 บทความ

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	(ก)
บทคัดย่อ	(ข)
Abstract	(ง)
Executive Summary	(ฉ)
สารบัญ	(ช)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 การตรวจเอกสาร	3
1.2.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน	4
1.2.2 งานวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว	6
1.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว	8
1.2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว	10
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	13
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	14
2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	14
2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	15
2.3 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	16
2.3.1 ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	16
2.3.2 ชนิดของหัวฉีด	17
2.4 โครงสร้างการไหลของกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	18
2.5 เจ็ทหมุนควง	20
2.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของเจ็ทหมุนควง	20
2.5.2 ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง	21
2.6 สมการพื้นฐานที่ใช้ในคำนวณการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย	25
3.1 วิธีการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง	25
3.2 รายละเอียดของชุดทดลอง	27
3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	29
3.3.1 ชุดทดลอง	29
3.3.2 วิธีการทดลอง	31
3.3.3 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล	32
3.3.4 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	36
3.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว	37
3.5 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทิศน์	38
3.6 การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง	42
4.1 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว	42
4.1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระ	42
4.1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิว	44
4.1.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ	46
4.1.4 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศลำเดียว	48
4.1.5 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน บนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ	53
4.1.6 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่เป็นเจ็ทอากาศ และเจ็ทน้ำ	55
4.2 การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศลำเดียวพุ่งชน	56
4.2.1 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่อ การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า	57
4.2.2 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว กรณีของเจ็ทลำเดียว	58
4.2.3 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียว ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ต่างๆ	63
4.3 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว กรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน 70

4.5 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีผลต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน 73

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 78

5.1 สรุปผลการทดลอง 78

5.2 ข้อเสนอแนะ 79

บรรณานุกรม 80

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว. 82

ภาพผนวก 84

ก ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน 84

ข ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว 87

ค ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ 95

ง ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว 97

จ ผลการศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว 100

ฉ ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ 103

ช การวิเคราะห์ภาพสีโดยใช้ระบบ RGB 105

ซ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ 111

ฌ การนำเสนอผลงานทางวิชาการ 118

ญ แบบชุดทดลอง 183

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาทางด้านพลังงาน โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มปริมาณการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการพยายามหาวิธีการที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน สำหรับวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมคือ การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์และกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความร้อน เนื่องจากในกระบวนการผลิตวัตถุดิบที่เป็นโลหะ แก้ว สิ่งทอ อาหาร ยารักษาโรค จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และกระบวนการทางด้านความร้อน หากมีการพัฒนาให้อุปกรณ์ด้านความร้อนมีประสิทธิภาพสูงจะสามารถช่วยลดต้นทุนการใช้พลังงานได้มหาศาลในแต่ละปี

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ด้านความร้อนจะมีกระบวนการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างตัวกลางกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนหลายๆลักษณะ เช่น การให้ความร้อน (Heating) การระบายความร้อน (Cooling) หรือการเป่าแห้ง (Drying) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (Convection heat transfer) สำหรับอัตราการพาความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวสามารถแสดงในรูปสมการดังนี้

$$\dot{Q} = hA(\Delta T) \tag{1.1}$$

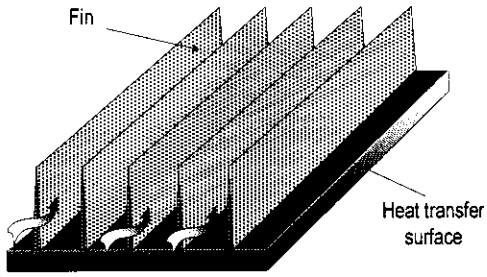
โดยที่ $\dot{Q}$ คือ อัตราการพาความร้อน

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

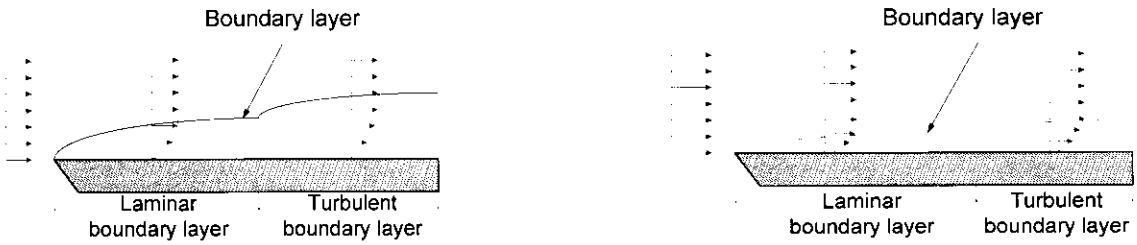
ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

จากสมการที่ (1.1) หากต้องการเพิ่มอัตราการพาความร้อน $\dot{Q}$ สามารถทำได้สองวิธีคือ วิธีการเพิ่มพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน A ทำได้โดยการเพิ่มพื้นผิวที่สัมผัสกับของไหล เช่น การติดครีบ (Fin) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนตามที่แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งวิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับงานประเภทที่ไม่คำนึงถึงขนานและน้ำหนักของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามไม่เหมาะสำหรับงานบางประเภทเนื่องจากวิธีดังกล่าวมีผลเสียที่ตามมาคือ สิ้นเปลืองวัสดุ อุปกรณ์มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก หากกรณีที่เป็นการไหลในช่องทางปิดก็จะเกิดการสูญเสียความดันในระบบ เนื่องจากตัวครีบจะเป็นตัวต้านการไหล ทำให้ต้องเพิ่มกำลังของปั๊มหรือพัดลมในระบบให้มากขึ้น



รูปที่ 1.1 แสดงการติดครีบ (Fin) ลงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

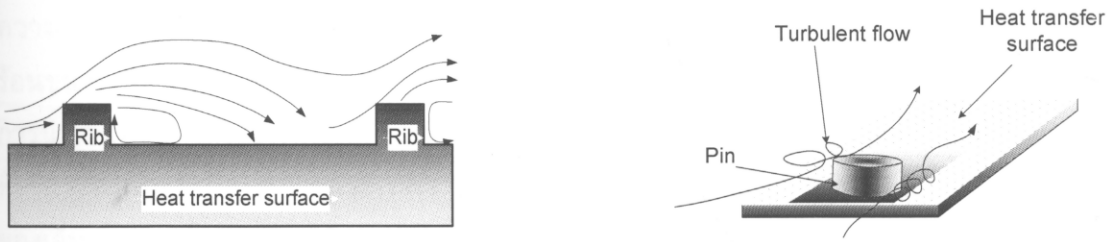
วิธีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ในกรณีที่ของไหลไหลผ่านพื้นผิวที่อยู่นิ่งกับที่ ความหนืด (Viscosity) จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างต่อเนื่องโดยบริเวณที่ใกล้กับพื้นผิวจะมีความเร็วต่ำ และที่ตำแหน่งห่างจากพื้นผิว ความเร็วของของไหลจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ จนถึงบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ จะเรียกชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้ว่า "ชั้นขอบเขต (Boundary layer)" ด้วยเหตุที่ภายในชั้นขอบเขตของไหลจะมีความเร็วต่ำ เป็นผลทำให้ภายในชั้นขอบเขตมีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดี เปรียบเสมือนภายในชั้นขอบเขตเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h สามารถทำได้โดยการลดความหนาของชั้นขอบเขต โดยการเพิ่มความเร็วให้กับของไหลตามที่แสดงในรูปที่ 1.2 อย่างไรก็ตามจากการที่ต้องเพิ่มความเร็วของของไหลจะเกิดผลเสียที่ตามมาคือ ต้องเพิ่มกำลังของปั๊มหรือพัดลมให้กับระบบ



(ก) ความเร็วต่ำ (ชั้นขอบเขตหนา) (ข) ความเร็วสูง (ชั้นขอบเขตบาง)

รูปที่ 1.2 แสดงชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว

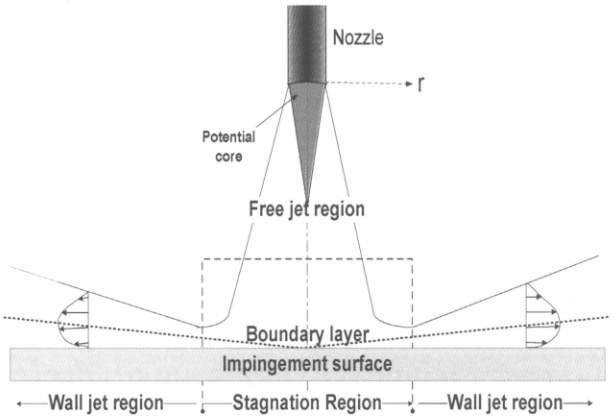
การเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h สามารถทำได้อีกวิธีคือ การทำลายชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับพื้นผิว ด้วยการติดอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulator) เช่น กลุ่มของริบ (Rib) หรือพิน (Pin) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนตามที่แสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวได้ เนื่องจากการไหลจะเกิดกระแสหมุนวนขึ้นเมื่อผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน ทำให้ชั้นขอบเขตการไหลถูกทำลาย แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องคำนึงถึงการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น



(ก) ริบ (Rib) (ข) พิน (Pin)

รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนด้วยวิธีการติดริบและพิน

การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (Impinging jet) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ของไหลจากหัวฉีด (Nozzle) พุ่นชนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 วิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าวิธีอื่นๆเมื่อเทียบอัตราการไหลที่เท่ากัน จึงสามารถช่วยประหยัดพลังงานของปั๊มหรือพัดลมได้ดี นอกจากนั้นยังสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเฉพาะจุดโดยการใช้เจ็ทลำเดียว แต่อย่างไรก็ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ในกรณีที่ต้องการความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวหรือพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมีบริเวณกว้าง จำเป็นต้องใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวตามความเหมาะสม



รูปที่ 1.4 แสดงวิธีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน

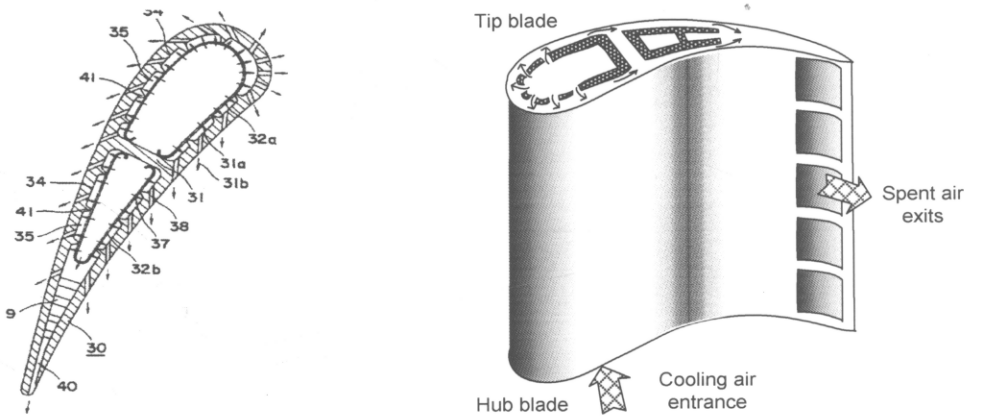
1.2 การตรวจเอกสารงานวิจัย

การถ่ายเทความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้มีการศึกษามานานตั้งแต่อดีต มีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทและคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกเจ็ทพุ่งชน จากการที่ได้ศึกษาพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกชนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเจ็ทก่อนพุ่งชนและการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวหลังจากการชน เนื่องจากการใช้เจ็ทพุ่งชนนั้นให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวสูงกว่าวิธีอื่นๆ จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเช่น การระบาย

ความร้อนใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์หรือใช้ในอุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำเจ็ทพุ่งชนไปใช้งานในอุปกรณ์ด้านความร้อนที่ได้รับการจดสิทธิบัตรและการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนรวมถึงการศึกษาโครงสร้างลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน

1.2.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน

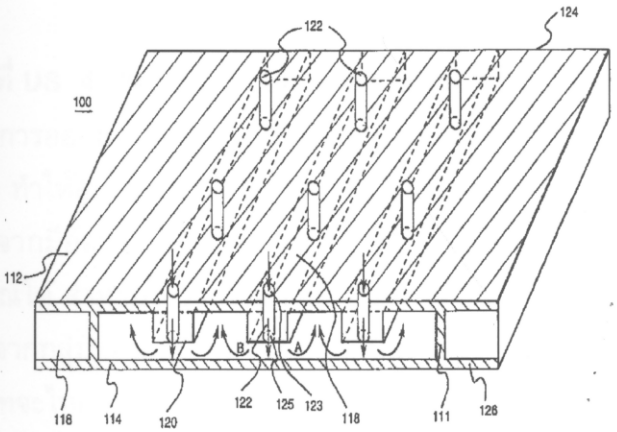
สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,533,864 การระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ [1] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์โดยใช้เจ็ทพุ่งชนตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.5 ในการออกแบบได้เป่าอากาศไหลเข้าด้านในใบพัดผ่านช่องด้านล่างของใบพัด หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านรูต่าง ๆที่ได้ออกแบบไว้และพุ่งชนพื้นผิวที่ต้องการระบายความร้อน ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างภายในใบพัดค่อนข้างที่จะซับซ้อนโดยเฉพาะใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ที่มีขนาดเล็ก



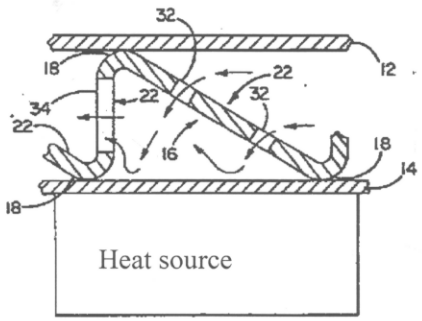
(ก) ภาพตัดของใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ (ข) โครงสร้างภายในของใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์

รูปที่ 1.5 การระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,533,864 [1])

สิทธิบัตรลำดับที่ US 6,000,908 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ [2] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนในผนังห้องเผาไหม้ตามที่แสดงในรูปที่ 1.6 โดยออกแบบใช้กับห้องเผาไหม้ที่เป็นผนังคู่ แผ่นหนึ่งใว้สัมผัสกับก๊าซร้อนโดยตรงส่วนอีกแผ่นใช้สำหรับติดตั้งหัวฉีด เพื่อปล่อยเจ็ทให้ไหลพุ่งชนผนังที่สัมผัสกับก๊าซร้อนทำให้เกิดการระบายความร้อนขึ้น สำหรับสิทธิบัตรนี้ได้มีแนวคิดเกี่ยวกับการจัดระบบการไหลของกระแสลมทิ้ง (Spent air) ให้ไหลออกอย่างเป็นระบบ เนื่องจากการนำเจ็ทพุ่งชนมาใช้กับห้องเผาไหม้ระบบผนังสองชั้น จะมีปัญหาในเรื่องกระแสลมทิ้งไหลตัดผ่านกระแสลมเจ็ทที่กำลังพุ่งชนพื้นผิว (Cross-flow) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนบนพื้นผิวลดลง

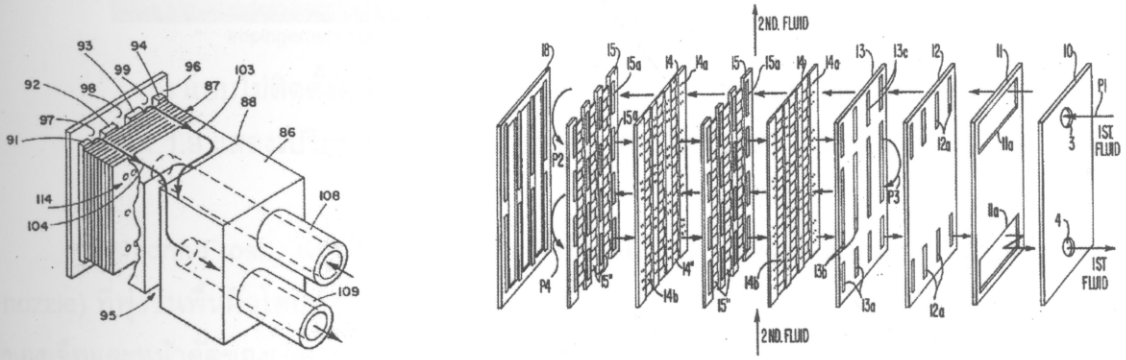


รูปที่ 1.6 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 6,000,908 [2])



รูปที่ 1.7 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,329,994 [3])

สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,329,994 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [3] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเจ็ทพุ่งชนตามที่แสดงในรูปที่ 1.7 สำหรับโครงสร้างประกอบไปด้วยแผ่นระนาบสองแผ่นที่วางขนานกัน และแผ่นระนาบอีกหนึ่งแผ่นดัดให้หยักแล้วเจาะรูเป็นออร์ริฟิสสอดระหว่างแผ่นระบาบทั้งสองที่วางขนานกัน เมื่อของไหลไหลผ่านออร์ริฟิสจะเปลี่ยนเป็นเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวระบายความร้อนที่ติดอยู่กับแหล่งความร้อน ทำให้เกิดการระบายความร้อนบนพื้นผิวขึ้น หลังจากนั้นอากาศร้อนก็จะไหลออกตามช่องที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 1.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและโครงสร้างภายใน (สิทธิบัตรลำดับที่ US 4,494,171[4])

สิทธิบัตรลำดับที่ US 4,494,171 การถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [4] สำหรับสิทธิบัตรนี้เป็นการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยนำหลักการของเจ็ทพุ่งชนมาใช้ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.8 ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงและมีน้ำหนักเบา เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเดิม เนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง ทำให้สามารถลดพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนหรือขนาดของอุปกรณ์ได้ สำหรับโครงสร้างภายในอุปกรณ์จะใช้แผ่นออร์ริฟิสหลายๆแผ่นวางซ้อนกัน โดยที่เจ็ทจะไหลออกจากกลุ่มของออร์ริฟิสที่อยู่บนแผ่นแรกและพุ่งชนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนของแผ่นถัดไป หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลผ่านแผ่นออร์ริฟิสหลายๆชั้นในลักษณะเดียวกัน

1.2.2 งานวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

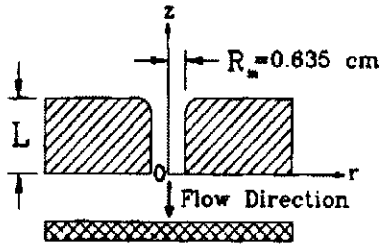
Ashforth-Frost และ Jambunathan [5] ได้ศึกษาผลกระทบจากลักษณะของหัวฉีดและการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในการทดลองได้เลือกใช้หัวฉีดสองประเภทที่ให้ลักษณะการกระจายความเร็วที่ปากทางออกแบบสม่ำเสมอ (Flat velocity profile) และแบบที่พัฒนาแล้ว (Fully developed velocity profile) พบว่าส่วนโพเท็นเชียลคอร์ (Potential core) ของเจ็ทที่มีการกระจายความเร็วที่ปากทางออกแบบพัฒนาแล้วจะยาวกว่าของแบบสม่ำเสมอประมาณ 7% นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทโดยติดตั้งผนังด้านหัวฉีดตามที่แสดงในรูปที่ 1.9 พบว่าการติดตั้งผนังด้านหัวฉีด (รูปที่ 1.9 (ข)) มีผลทำให้โพเท็นเชียลคอร์ยาวกว่าแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด (รูปที่ 1.9 (ก)) ประมาณ 20% และในกรณีที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวพบว่าการติดตั้งผนังด้านหัวฉีดทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด ซึ่งเป็นผลจากการที่เจ็ทถูกจำกัดบริเวณการไหลหลังจากที่พุ่งชนผนัง

(ก) แบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด (ข) แบบติดตั้งผนังด้านหัวฉีด

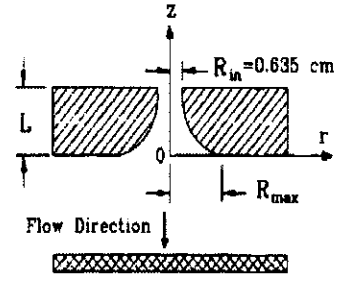
รูปที่ 1.9 แสดงเปรียบเทียบการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทโดยติดตั้งผนังด้านหัวฉีด

Ashforth-Frost และคณะ [6] ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทจากหัวฉีดแบบสล็อต (Slot nozzle) ที่พุ่งชนพื้นผิวโดยทำการวัดความเร็วเฉลี่ยและระดับความปั่นป่วน (Turbulence) ตามแนวแกนของเจ็ทและหน้าตัดของเจ็ท จากการศึกษาพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสอดคล้องกับความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่วัดได้ คือในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

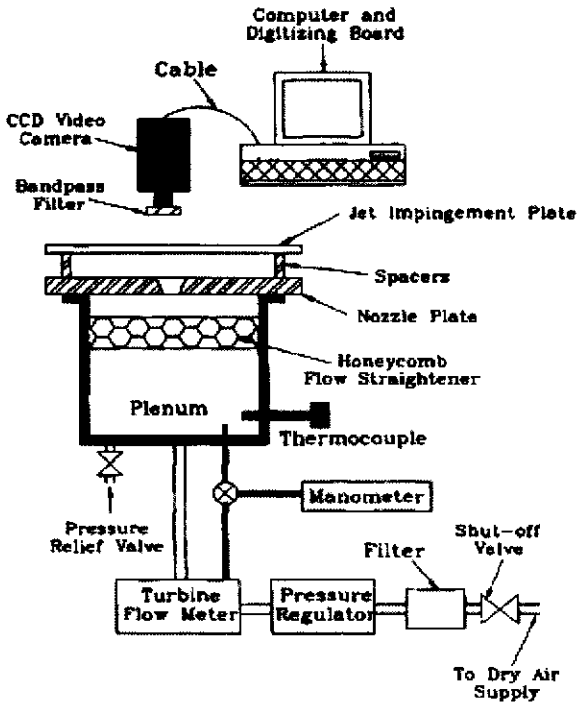
L=4W (W คือความกว้างของสล็อต) ซึ่งเป็นระยะที่โพเท็นเชียลคอร์ของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว พบว่าระดับความปั่นป่วนจุดที่เจ็ทพุ่งชนบนผนังมีค่าน้อย และในขณะที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิว ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณ คือ จุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=9.2W เนื่องจากที่ระยะดังกล่าวโพเท็นเชียลคอร์ของเจ็ทหมดลงทำให้ระดับความปั่นป่วนในเจ็ทสูงขึ้น และเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนที่ระยะห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ



(ก) ออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบคม



(ข) ออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบมน



(ค) ชุดทดลอง

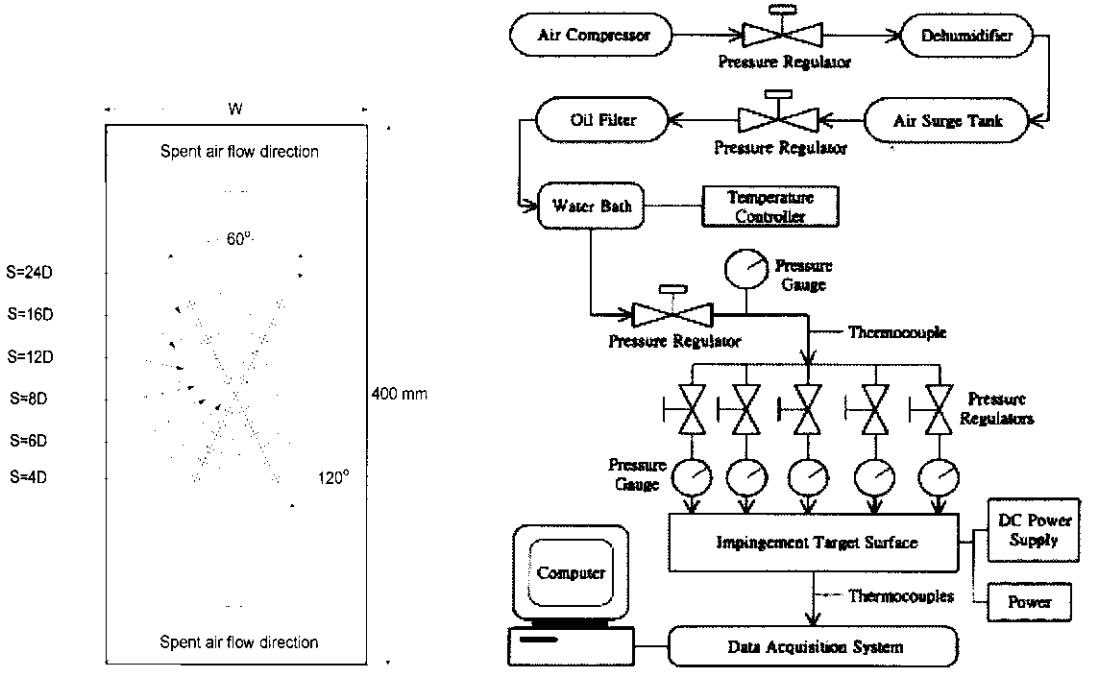
รูปที่ 1.10 แสดงลักษณะหัวฉีดและชุดทดลองของ Colucci และ Viskanta [7]

Colucci และ Viskanta [7] ได้ศึกษาผลของลักษณะปากทางออกของหัวฉีดที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน หัวฉีดที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบออร์ริฟิสมีสองลักษณะ คือออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบคม (รูปที่ 1.10 (ก)) และออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบมน (รูปที่ 1.10 (ข)) จากการศึกษาพบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L \leq D$ (D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ริฟิส) ลักษณะปากทางออกของออร์ริฟิสจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวอย่างมาก โดยที่ออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบมนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบคม โดยเฉพาะที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่สูง $Re \geq 30000$ และนอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบนพื้นผิวจะเกิดขึ้นสองบริเวณ โดยบริเวณแรกจะเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (r=0) และบริเวณที่สองจะเกิดขึ้นตามแนวรัศมีที่อยู่

ในช่วง r=1D-2D ห่างจากจุดจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยที่ตำแหน่งของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สองจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของหัวฉีดและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

1.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

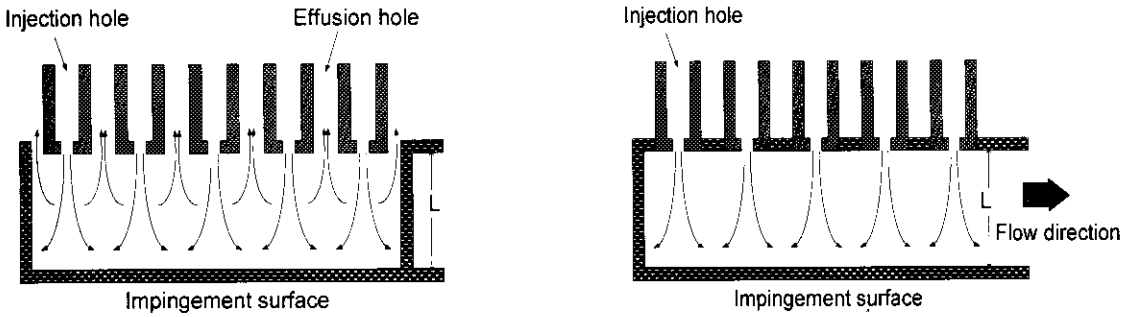
ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงกลุ่มของเจ็ท ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) รวมถึงผลกระทบของกระแสไหลตัด (Cross flow) ซึ่งมีผลต่อลักษณะการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว มีหลายงานวิจัยพยายามที่จะศึกษาหาตัวแปรดังกล่าวเพื่อหาเงื่อนไขที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบนพื้นผิวหรือเงื่อนไขที่ให้การถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอที่สุด



(ก) ลักษณะการจัดเรียงของเจ็ท (ข) ชุดทดลอง

รูปที่ 1.11 แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทและชุดทดลองการทดลองของ San และ Lai [8]

San และ Lai [8] ได้ทำการทดลองโดยใช้กลุ่มของเจ็ท 5 ลำพุ่งชนพื้นผิวเรียบโดยใช้ท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 mm ในการจัดเรียงของเจ็ทกำหนดให้เจ็ท 1 ลำอยู่ตรงกลางและเจ็ท 4 ลำที่เหลือล้อมรอบตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.11 (ก) ในการทดลองได้กำหนดระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L = 2D, 3D, 4D และ 5D ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ในช่วง Re=10,000 - 30,000 และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทจะอยู่ในช่วง S = 4D-24D จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลทำให้บริเวณที่เจ็ทที่อยู่ตรงกลางพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือ ที่เงื่อนไขระยะ L= 2D และระยะ S=8D ที่เงื่อนไขระยะ L=3D และระยะ S=12D และที่เงื่อนไขระยะ L=5D และระยะ S=6D



(ก) ผนังด้านหัวฉีดที่มีรูระบายอากาศ (ข) ผนังด้านหัวฉีดที่ไม่มีรูระบายอากาศ

รูปที่ 1.12 แสดงลักษณะผนังด้านหัวฉีดที่ใช้สำหรับการทดลองของ Rhee และคณะ [9]

Rhee และคณะ [9] ได้ศึกษาผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารบนพื้นผิวกรณีที่ใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชน โดยออกแบบผนังด้านหัวฉีดมีสองลักษณะคือ แบบที่เป็นผนังเรียบธรรมดาและแบบที่เจาะรูระบายลมทิ้ง (Effusion holes) ตามที่แสดงในรูปที่ 1.12 จากการศึกษาพบว่า ผนังด้านหัวฉีดที่ออกแบบให้มีรูระบายลมทิ้ง (รูปที่ 1.12 (ก)) จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารสูงกว่ากรณีของผนังด้านหัวฉีดแบบไม่เจาะรูระบายลมทิ้ง (รูปที่ 1.12 (ข)) ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L<2D โดยเฉพาะที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L= 0.5D และ 1.0D อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารจะต่างกันถึง 60 % และ 20 % ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L≥2D อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของผนังหัวฉีดทั้งสองแบบจะแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L<2D หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะถูกจำกัดบริเวณการไหล เกิดการรวมตัวกันเป็นกระแสไหลตัด (Cross flow) รบกวนการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวลดลง แต่ในกรณีที่ผนังหัวฉีดมีการเจาะรูระบายลมทิ้งจะทำให้เจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิวระบายออกตามรูที่เจาะไว้ ส่งผลให้เกิดการไหลรบกวนเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวน้อยลง จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบระบายลมทิ้งลักษณะดังกล่าว หากนำไปใช้งานจริงจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นระหว่างอากาศที่ไหลเข้าท่อเจ็ทและไหลออกทางรูระบาย ทำให้อากาศที่ไหลเข้าและไหลออกมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากช่องทางเข้าและช่องทางออกของอากาศอยู่ติดกัน

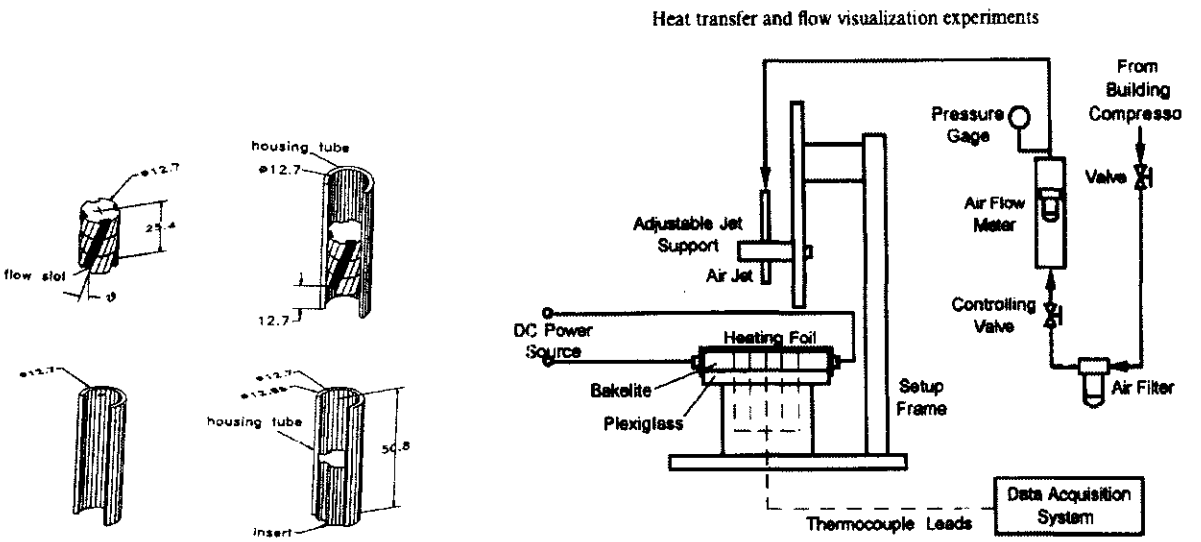
Fenot และคณะ [10] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโค้งโดยใช้เจ็ทแถวพุ่งชน ในการทดลองได้ใช้เจ็ทอากาศเรียงเป็นแบบแถวจำนวน 7 ลำ พุ่งชนด้านในของพื้นผิวโค้งด้านเว้า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบแบบมีผนังด้านหัวฉีด (Nozzle wall) และพื้นผิวเรียบที่ไม่มีผนังด้านหัวฉีด จากการทดลองพบว่ารัศมีส่วนโค้งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ในกรณีที่รัศมีส่วนโค้งมาก นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวจะลดลงเนื่องจากเจ็ทจะถูกจำกัดบริเวณการไหลด้วยผิวโค้งที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งผลจากการทดลองดังกล่าวจะสอดคล้องกับกรณีที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเรียบแบบมีผนังด้านหัวฉีด สำหรับกรณีที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวเรียบที่ไม่มีผนังด้านหัวฉีด

พบว่า มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโค้งและพื้นผิวเรียบที่มีผนังด้านหัวฉีด เนื่องจากเจ็ทสามารถไหลระบายออกนอกบริเวณที่พุ่งชนได้ดี

1.2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว

ในหัวข้อนี้จะนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทหมุนควงที่ใช้ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงลักษณะต่างๆ เช่น การใช้แผ่นบิด แผ่นบิดแบบกากบาทและแท่งเฮอลิคอลสอดในท่อ เจ็ท นอกจากนี้ยังได้ศึกษากรณีที่ใช้ใบบังคับทิศทางติดที่ปากทางออกของหัวฉีด

Huang และ El-Genk [11] ได้ออกแบบอุปกรณ์สร้างกระแสเจ็ทหมุนควงสำหรับสอดในท่อเจ็ท โดยอุปกรณ์มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตัน ควั้านให้เป็นร่องจำนวน 4 ร่อง ทำมุมกับแกนของเจ็ทตามที่แสดงในรูปที่ 1.13 (ก) ในการทดลองมุมเอียงที่ใช้ในการกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงได้แก่ 15°, 30° และ 45° จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว พบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและเพิ่มความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้เมื่อเทียบกับเจ็ทจากท่อเปล่า และเงื่อนไขที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด คือในกรณีที่มุมของร่องเท่ากับ 15 องศา และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทโดยใช้ควันผสมกับเจ็ทอากาศ (Smoke flow technique) การใช้เส้นลวดร้อนทาน้ำมันเพื่อกำเนิดควัน (Smoke wires technique) และใช้ฟองอากาศผสมกับเจ็ทน้ำเพื่อดูลักษณะการไหล พบว่าเจ็ทหมุนควงมีบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนบนผนังเป็นบริเวณกว้างกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า และนอกจากนี้ยังพบว่าเจ็ทมีการหมุนควงภายในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า



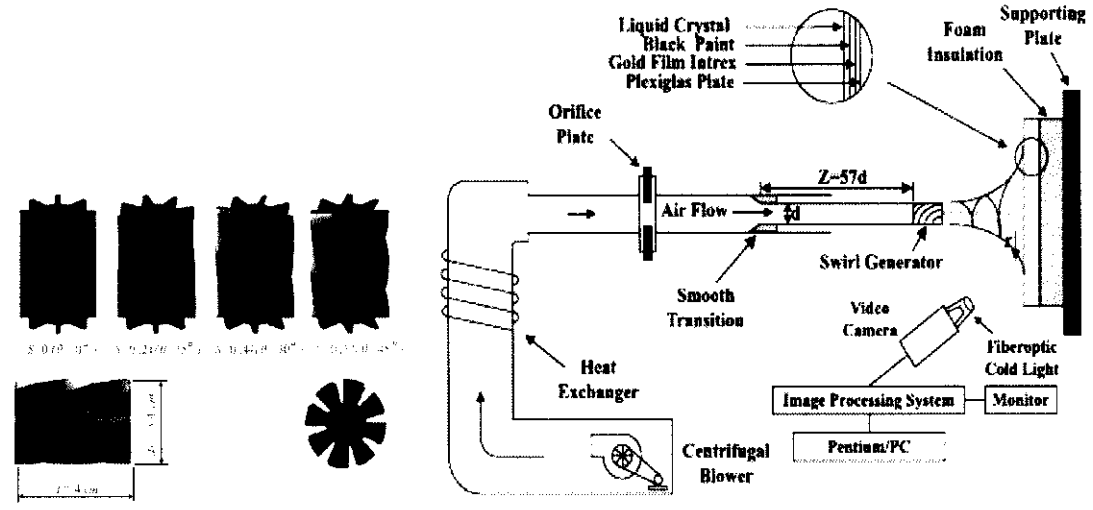
(ก) ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง (ข) ชุดทดลอง

รูปที่ 1.13 ลักษณะของตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงและชุดทดลองของ Huang และ El-Genk [11]

Wen และ Jang [12] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างเจ็ทจาก

ท่อเปล่ากับเจ็ทหมุนควงที่สอดแผ่นบิดแบบธรรมดาและแผ่นบิดแบบกากบาท จากการศึกษาพบว่า เจ็ทที่ไหลออกมาจากท่อที่สอดแผ่นบิดแบบกากบาทจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือท่อที่สอดแผ่นบิดแบบธรรมดาและท่อเปล่าตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ส่วนการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วยวิธีเชิงทัศน์ ได้ใช้เทคนิคผสมควันในเจ็ทอากาศ (Smoke flow technique) ทำให้สามารถเห็นลักษณะการไหลของเจ็ท ซึ่งพบว่าการไหลของเจ็ทหมุนควงบนพื้นผิวจะมีการหมุนวนของอากาศบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเกิดขึ้นและยังเกิดการผสมกับอากาศบริเวณรอบๆได้ดีกว่าเจ็ทจากท่อเปล่าอีกด้วย

Lee และคณะ [13] ได้ใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นใบบังคับทิศทางติดด้านในที่ปากทางออกของท่อเจ็ทเพื่อเป็นตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงตามที่แสดงในรูปที่ 1.14 (ก) โดยใบบังคับทิศทางทำมุมกับแนวแกนที่มุม θ ต่างๆซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl Number, Sw) โดยเริ่มที่ Sw=0.0(θ=0 $^{\circ}$), 0.21(θ=15°), 0.44(θ=30°), 0.77(θ=45°), และเจ็ทจากท่อเปล่า สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 23,000 จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพบว่าระดับการหมุนควงของเจ็ทมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนในบริเวณใกล้จุดที่เจ็ทพุ่งชนมาก โดยที่เงื่อนไขค่า Sw=0.21 และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D จะให้นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงที่สุด และที่เงื่อนไขเดียวกันนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวจะสูงกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง L=10D อิทธิพลของระดับการหมุนควงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง



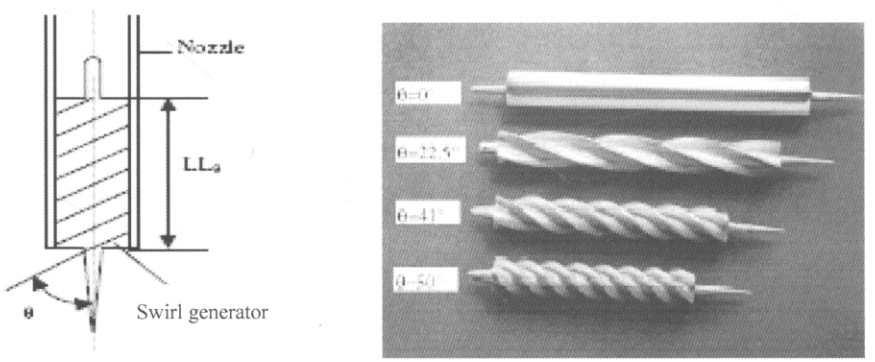
(ก) ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง (ข) ชุดทดลอง

รูปที่ 1.14 ลักษณะของตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงและชุดทดลองของ Lee และคณะ [13]

Alekseenko และคณะ [14] ได้สร้างเจ็ทหมุนควงโดยใช้หัวฉีดที่มีลักษณะเป็นท่อกลมที่ปากทางออกจะค่อยๆลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลง และด้านในจะติดตั้งตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงที่มีลักษณะเป็นใบบังคับทิศทางที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน โดยค่าสเวิร์ลนัมเบอร์อยู่ในช่วง 0-1.0 เรย์โนลด์นัมเบอร์ Re=8900 และระยะจากปากทางของออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=3D จากผลการทดลองพบว่าสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการแพร่กระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้น แต่การกระจายตัว

ของความดันภายในเจ็ทจะลดลง อย่างไรก็ตามในการทดลองไม่ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน แต่ข้อมูลจากการทดลองก็เป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับแนวคิดที่จะนำเจ็ทหมุนควงไปใช้ในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เพราะอัตราการแพร่กระจายของเจ็ทและการกระจายความดันถายในเจ็ทจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วย

Bakirci และ Bilen [15] ได้ทำการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ สำหรับหัวฉีดที่ใช้เป็นแบบท่อเปล่าและแบบท่อติดตั้งตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงที่เป็นแบบเฮอลิคอลตามที่แสดงในรูปที่ 1.15 โดยบิดให้เป็นเกลียวทำมุมกับแนวแกนดังนี้ θ= 0°, 22.5°, 41° และ 50° สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง Re=10,000–30,000 และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนชนอยู่ระหว่าง L= 6D – 14D สำหรับผลการทดลองปรากฏว่าท่อที่สอดเฮอลิคอลที่มีมุม θ= 50° นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะเกิดบริเวณรอบๆ แทนถึงสี่จุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากเจ็ทไหลแยกออกตามช่องทั้งสี่ ส่วนกรณีที่มุม θ=22.5° การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส เหมาะสำหรับการออกแบบระบบระบายความร้อนที่มีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนพื้นที่แคบๆและต้องการความสม่ำเสมอบนพื้นผิวที่สูง



รูปที่ 1.15 ลักษณะตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงของ Bakirci และ Bilen [14]

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิวพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนรวมถึงบริเวณรอบๆเจ็ทเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบไม่หมุนควง (เจ็ทจากท่อเปล่า) เนื่องจากการหมุนควงของเจ็ทจะเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบๆเจ็ท ทำให้เจ็ทมีอัตราการกระจายตัวที่เร็วและมีระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ในเจ็ทสูงเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบไม่หมุนควง ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวนั้นพบว่า ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเจ็ทหมุนควงมาประยุกต์ใช้ในกรณีกลุ่มของเจ็ท ซึ่งอาจจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากมีการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงก่อนพุ่งชนพื้นผิวและมีการไหลแบบหมุนควงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และอาจทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง รวมถึงพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควง เพื่อเป็น

ข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป เนื่องจากโครงสร้างการไหลกรณีกลุ่มของเจ็ทมีความซับซ้อนโดยเฉพาะการเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทหรือเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทผนัง ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทั้งสิ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

(1) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชน

(2) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ระดับการหมุนควงของเจ็ท ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงบนพื้นผิว เพื่อหาเงื่อนไขของตัวแปรที่เหมาะสมในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและปรับปรุงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

(1) ศึกษาในกรณีความเร็วในการไหลของเจ็ทอยู่ในช่วงซับโซนิค

(2) ศึกษากรณีการไหลของเจ็ทอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่เงื่อนไขอัตราการไหลคงที่

(3) ศึกษากรณีที่ใช้แผ่นบิดสอดในท่อเจ็ทเพื่อเป็นตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง

(4) ศึกษาในกรณีที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว

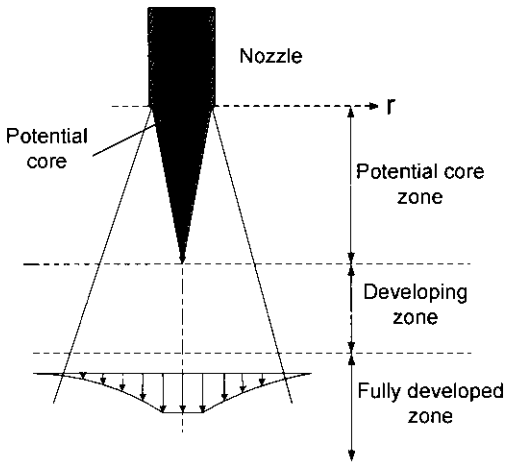
(5) ศึกษากรณีเจ็ทหมุนควงลำเดียวและกลุ่มของเจ็ท 9 ลำ ที่เรียงเป็นแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส 3 แถว แถวละ 3 ลำ

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

โดยปรกติลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของเจ็ทที่ออกมาจากหัวฉีด ในกรณีที่ต้องการกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจำเป็นต้องควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ท ซึ่งในการควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ทนั้นจะต้องศึกษาให้เข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ท สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว โครงสร้างการไหลของเจ็ทแบบกลุ่ม ลักษณะทั่วไปของเจ็ทหมุนควง และสุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง

2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

เจ็ทอิสระ (Free jet) คือ ของไหลที่ไหลออกจากหัวฉีดสู่ของไหลที่อยู่รอบๆโดยที่บริเวณแกนกลางของเจ็ทจะมีความเร็วสูงสุด เมื่อห่างจากปากทางออกความเร็วในแนวรัศมีจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และความเร็วในแนวแกนของเจ็ทก็จะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกันจนกระทั่งความเร็วเป็นศูนย์ ในกรณีที่อุณหภูมิระหว่างเจ็ทและของไหลที่อยู่รอบเจ็ทมีความแตกต่างกันก็จะเกิดการสมดุลอุณหภูมิขึ้นระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆ โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

(1) ช่วงโพเท็นเชียลคอร์ (Potential core zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มไหลออกจากหัวฉีด ความเร็วของเจ็ทคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด หลังจากที่เจ็ทพุ่งออกจากหัวฉีดแรงหนืดที่เกิดจากผลต่างของความเร็วระหว่างเจ็ทกับของไหลที่หยุดนิ่งอยู่รอบๆ จะทำให้บริเวณส่วน

ของโพเท็นเชียลคอร์ (Potential core) ของเจ็ทมีขนาดเล็กลงและของไหลบริเวณรอบๆเจ็ทถูกฉุดให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น มีผลทำให้หน้าตัดของเจ็ทขยายตัวกว้างขึ้นตามระยะห่างจากปากทางออก บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหน้าตัดเจ็ทรอบๆโพเท็นเชียลคอร์เรียกว่าเชียร์เลเยอร์ (Shear layer) ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของหัวฉีดยิ่งมาก ความหนาของเชียร์เลเยอร์ก็จะเพิ่มขึ้นและความยาวของโพเท็นเชียลคอร์จะลดลง โดยปรกติเจ็ทหน้าตัดวงกลมมีความยาวของโพเท็นเชียลคอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 4 - 6 ของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลที่ปากทางออกหัวฉีด [5]

(2) ช่วงการไหลกำลังพัฒนาตัว (Developing zone) เป็นช่วงที่โพเท็นเชียลคอร์ หมดไปและเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วในแนวแกนจะค่อยๆลดลงและมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนวแกนรัศมี ระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ภายในเจ็ทจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้

(3) ช่วงการไหลที่พัฒนาตัวแล้ว (Fully developed zone) เป็นบริเวณต่อจากช่วงการไหลกำลังพัฒนาตัวของเจ็ท ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์ และเป็นบริเวณที่โมเมนตัมของเจ็ทจะลดลงเมื่อห่างออกมาจากปากทางออกของหัวฉีดมากขึ้น

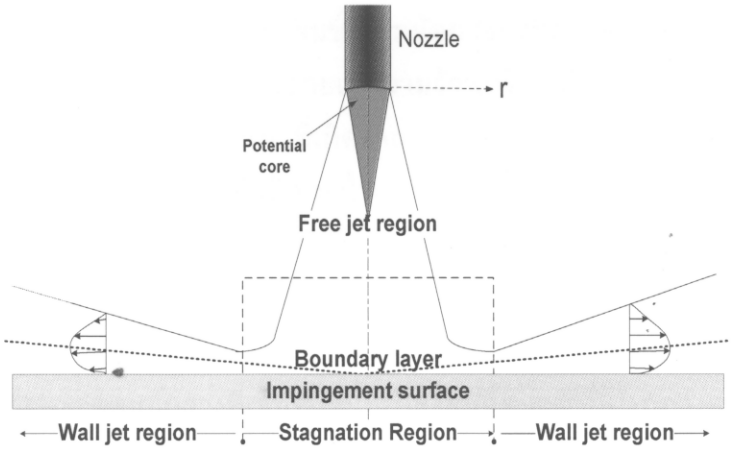
2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการไหลกรณีเจ็ทพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนดังนี้

(1) ช่วงเจ็ทอิสระ (Free jet region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีดซึ่งจะมีโพเท็นเชียลคอร์ (Potential core) อยู่กึ่งกลางโดยที่ความยาวของโพเท็นเชียลคอร์ขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยลักษณะทั่วไปส่วนที่เป็นเจ็ทอิสระของเจ็ทพุ่งชนจะเหมือนกับลักษณะทั่วไปของโครงสร้างการไหลเจ็ทอิสระ [5]

(2) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงและบริเวณรอบๆ ซึ่งก่อนเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวความเร็วของเจ็ทเริ่มลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนพื้นผิวล้อมรอบรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของการไหลรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลจากแนวแกนเป็นแนวรัศมีอย่างกะทันหันหลังจากการชนพื้นผิว

(3) ช่วงเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นการไหลของเจ็ทในแนวขนานบนพื้นผิวรอบๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) หลังจากการชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทที่ไหลบนพื้นผิวจะเริ่มลดลงโดยที่อัตราการลดความเร็วจะแปรผกผันจากระยะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมี ซึ่งส่งผลให้ชั้นขอบเขต (Boundary layer) บนพื้นผิวจะค่อยๆหนาขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ

2.3 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

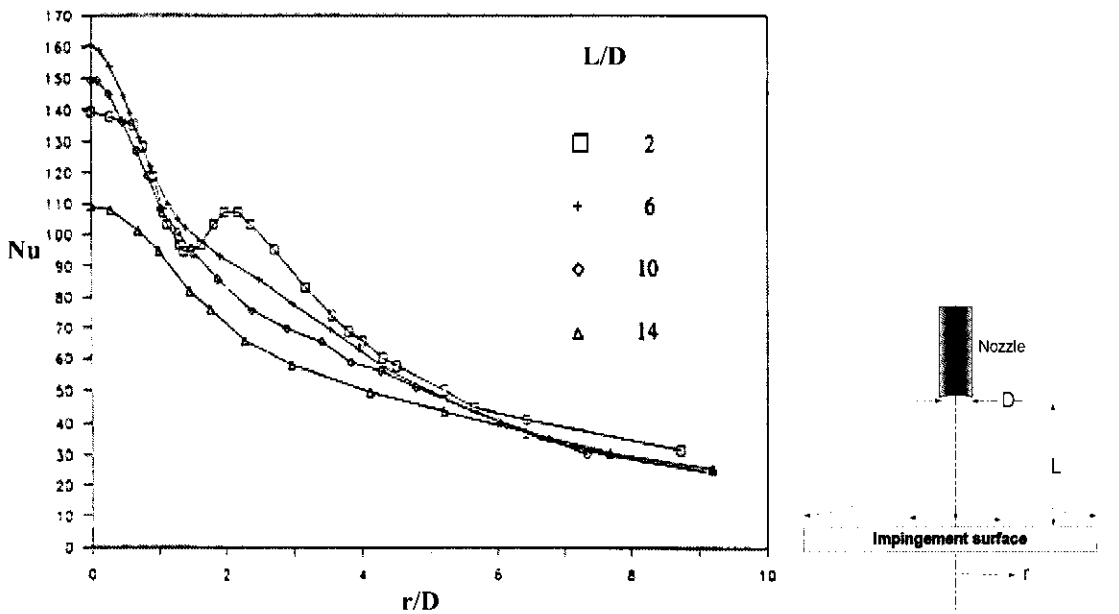
ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชนได้แก่ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและชนิดของหัวฉีด ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิว

2.3.1 ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

โดยทั่วไปบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณรอบๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ในกรณีที่ส่วนปลายสุดของโพเท็นเชียลคอร์พุ่งชนพื้นผิว จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงที่สุด เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีโมเมนตัมและมีค่าความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่สูง แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะลดลง เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง [5, 6, 7 และ 16]

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำเดียวที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบโดยใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) ในรูปแสดงผลกระทบของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่จุดต่างๆ ตามแกนรัศมีของเจ็ท (r) โดยกำหนดให้เรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทเท่ากับ 23,750 จากรูปที่ 2.3 พบว่ากรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point , r=0) และจะค่อยๆลดลง แต่ที่ตำแหน่ง r=1.5D อัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆเพิ่มอีกครั้งจนถึงตำแหน่ง r=2D จะเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak heat transfer) หลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนสาเหตุของการเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง อาจเกิดจากการที่เจ็ทผนังเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหล

แบบปั่นป่วน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [6] หรืออาจเกิดจากความเร่งของการไหลบนพื้นผิวหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วง r=1D ถึง 2D และอาจเกิดจากปรากฏการณ์ Surface renewal บนพื้นผิวที่เกิดจาก Large scale eddies ในโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนทำลายชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น [17] แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L>2D จากรูปที่ 2.3 พบว่านัสเซิลต์นัมเบอร์ของแต่ละระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point , r=0) และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวแกนรัศมีของเจ็ท และนัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าสูงสุดที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=6D ซึ่งเป็นระยะที่โครงสร้างการไหลของเจ็ทในส่วนโพเท็นเชียลคอร์กำลังจะหมดและระดับของความปั่นป่วนของเจ็ทเริ่มสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L>6D เป็นระยะที่โมเมดัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลงตามระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง [5 และ 16]

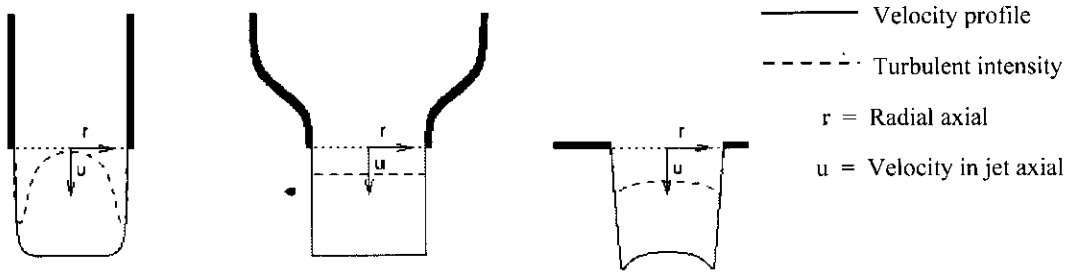


รูปที่ 2.3 การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ (กรณีที่ใช้หัวฉีดแบบท่อและ Re=23,750) [16]

2.3.2 ชนิดของหัวฉีด

รูปทรงของหัวฉีดจะมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติการไหลของเจ็ทสองประการคือ ลักษณะการกระจายความเร็ว (Velocity profile) และความปั่นป่วน (Turbulence profiles) ซึ่งคุณสมบัติการไหลของเจ็ททั้งสองประการมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว คือเจ็ทพุ่งชนที่มีความเร็วและระดับความ

ปั่นป่วนที่สูงจะมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงตามไปด้วย จากรูปที่ 2.4 แสดงการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่ตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีด 3 แบบที่นิยมใช้ทั่วไป



(ก) Pipe nozzle (ข) Bell-shaped nozzle (ค) Orifice

รูปที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติการกระจายความเร็วและการกระจายความปั่นป่วนที่ปากทางออกหัวฉีดแต่ละแบบ

กรณีหัวฉีดแบบท่อ (Pipe nozzle) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากท่อยาวที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ การกระจายความเร็วที่ปากทางออกจะมีลักษณะเหมือนกับการกระจายความเร็วของการไหลในท่อ ดังแสดงในรูป 2.4(ก) ส่วนการกระจายความปั่นป่วนจะต่ำบริเวณกึ่งกลางท่อและจะสูงบริเวณใกล้ขอบท่อ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของพื้นผิวท่อ

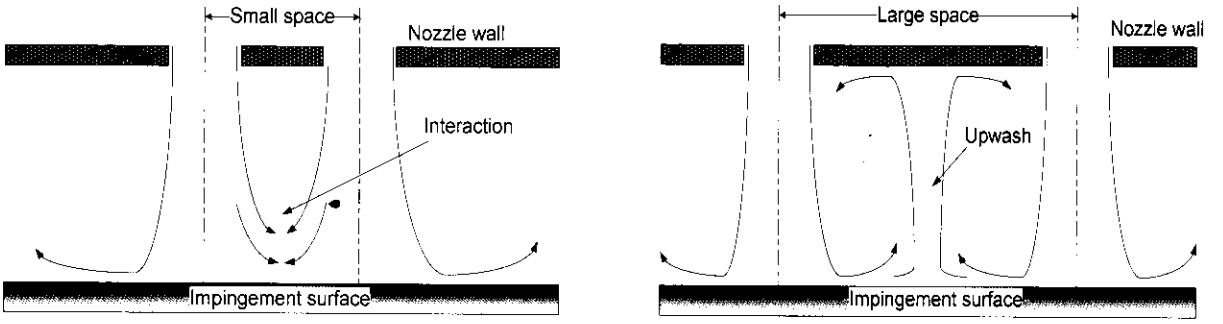
กรณีหัวฉีดแบบระฆัง (Bell-shaped nozzle) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากหัวฉีดที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดก่อนเจ็ทไหลออกจากปากทางออก จึงมีผลทำให้การกระจายความเร็วที่ปากทางออกค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ และระดับความปั่นป่วนที่ปากทางออกเจ็ทค่อนข้างต่ำและกระจายสม่ำเสมอตามที่แสดงในรูป 2.4(ข)

กรณีหัวฉีดแบบออร์ริฟิส (Orifice) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากรูเจ็ทที่เจาะบนแผ่นบาง บริเวณใกล้ขอบที่ปากทางออกเจ็ทจะมีความเร็วของเจ็ทสูงกว่าบริเวณกึ่งกลางเจ็ทเล็กน้อย และการไหลของเจ็ทจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นในบริเวณใกล้ปากทางออก เนื่องจากที่ปากทางออกจะเกิดปรากฏการณ์ Vena contracta ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเจ็ทที่ออกจากปากทางออกลดลง ระดับความปั่นป่วนที่ปากทางออกของหัวฉีดแบบออร์ริฟิสค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับหัวฉีดแบบอื่นตามที่แสดงในรูป 2.4(ค)

2.4 โครงสร้างการไหลของกลุ่มของเจ็ท

โดยปรกติเจ็ทลำเดียวมักจะถูกนำไปใช้ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีบริเวณจำกัดหรือเฉพาะจุดบนพื้นผิว แต่ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีบริเวณกว้างจำเป็นต้องใช้เจ็ทหลายๆ ลำหรือกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน (Multiple impinging jets) เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว โครงสร้างการไหลกรณีกลุ่มของเจ็ทจะซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทลำเดียว

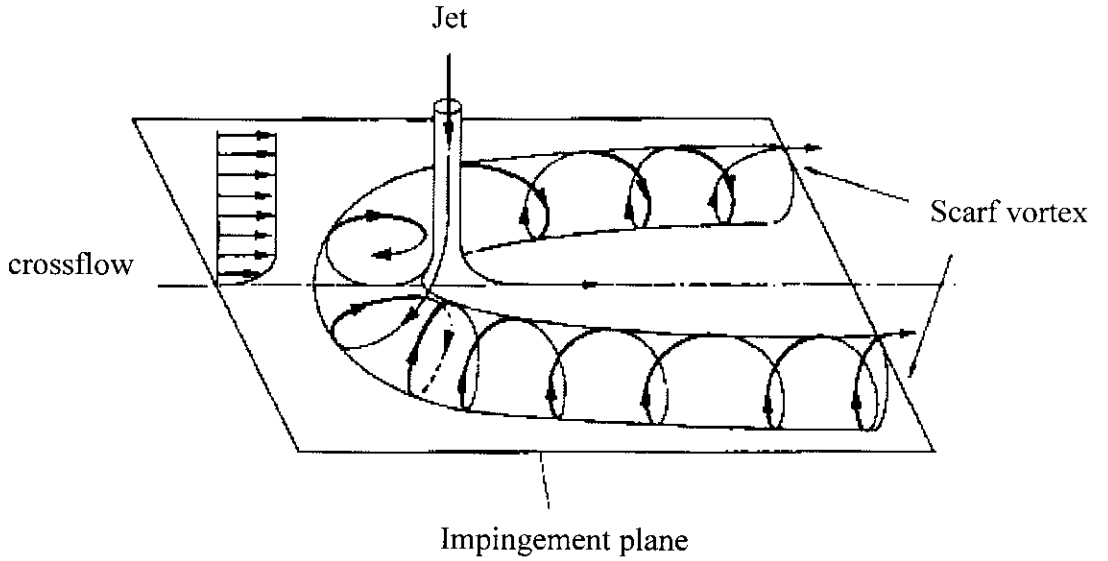
โดยเฉพาะในกลุ่มของเจ็ทจะมีตัวแปรที่เพิ่มเข้ามาเช่น รูปแบบการจัดเรียงตัวของเจ็ทและระยะห่างระหว่างลำเจ็ทซึ่งจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



(ก) กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย (ข) กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมาก

รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกลุ่มของเจ็ท [13]

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย (รูปที่ 2.5(ก)) ก่อนที่เจ็ททั้งสองลำจะพุ่งชนพื้นผิว จะเกิดการผสมกันระหว่างลำเจ็ททั้งสอง มีผลทำให้บริเวณโพเท็นเชียลคอร์ในลำเจ็ทลดลงและระดับความปั่นป่วนในเจ็ทจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทลำเดียว หรือในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมาก (รูปที่ 2.5(ข)) ถึงแม้ก่อนเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะไม่เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กัน แต่หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแล้วจะเกิดการชนของเจ็ทผนังที่มาจากลำเจ็ทที่อยู่ติดกันแล้วเกิดการไหลแบบหมุนวน (Fountain) ในระหว่างลำเจ็ท [8]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างการไหลแบบเกือกม้าที่เกิดจากกระแสลมไหลตัดผ่านลำเจ็ทที่กระทบผนัง [9]

นอกจากนี้เจ็ทหลังจากที่พุ่งชนพื้นผิวแล้วจะเปลี่ยนเป็นกระแสไหลตัด (Cross-flow) ผ่านลำเจ็ทที่อยู่ตำแหน่งด้านหลัง (Downstream) รูปที่ 2.6 แสดงถึงโครงสร้างการไหลแบบเกือกม้า (Horse shoe) ที่เกิดจากการปะทะระหว่างกระแสลมตัดกับเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจะเกิดกระแสหมุนวน (Scarf vortex) ไหลแยกออกสองข้างของลำเจ็ท และในกรณีที่กระแสลมที่ไหลตัดผ่านมีความเร็วสูง จะทำให้กระแสเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเกิดการหันเหส่งผลทำให้สูญเสียโมเมนตัมของเจ็ทในการพุ่งชนพื้นผิว จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดลง ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมของเจ็ทและกระแสลมตัดจะมีผลต่อการไหลของเจ็ทบนผนัง [18]

2.5 เจ็ทหมุนควง

เจ็ทหมุนควงเป็นเจ็ทของไหลเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดที่มีทั้งความเร็วตามแนวแกนและความเร็วแนวสัมผัส ซึ่งวิธีการสร้างเจ็ทหมุนควงสามารถทำได้หลายวิธี ในแต่ละวิธีโครงสร้างการไหลของเจ็ทจะแตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทั่วไปของเจ็ทหมุนควง นิยามของระดับการหมุนควงและตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง

2.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของเจ็ทหมุนควง

เจ็ทหมุนควงเป็นการไหลที่รวมคุณสมบัติการหมุนที่มีส่วนของความเร็วในแนวสัมผัสเพิ่มขึ้นจากการไหลของเจ็ท ซึ่งคุณลักษณะบางประการที่แตกต่างจากการไหลของเจ็ทแบบไม่หมุนควง สำหรับเจ็ทไม่หมุนควงนั้นกลไกการกระจายตัวของเจ็ทจะเกิดจากการผสมกันที่ขอบของเจ็ทและของไหลรอบๆ แต่สำหรับเจ็ทหมุนควงแล้วเนื่องจากการหมุนควงทำให้เกิดความชันของความดัน (Pressure gradient) ตามแนวแกนและแนวรัศมีของเจ็ท จึงทำให้การกระจายตัวของเจ็ทเกิดจากความชันของความดันด้วย นอกจากนั้นจะไม่พบส่วนของโพเท็นเชียลคอร์ภายในโครงสร้างของเจ็ทหมุนควง ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกระดับการหมุนควงคือ สเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number, Sw) ซึ่งมีนิยามคืออัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมตามแนวสัมผัสต่อโมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ทตามที่ได้แสดงในสมการต่อไปนี้ [11 และ 14]

$$Sw = \frac{G_\theta}{(D/2)G_n} \tag{2.1}$$

$$G_n = \int_0^{D/2} \rho V_n^2 \cdot (2\pi r dr) \tag{2.2}$$

$$G_\theta = \int_0^{D/2} \rho V_n V_\theta r \cdot (2\pi r dr) \tag{2.3}$$

ในที่นี้ G_n คือ โมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ท

G_θ คือ โมเมนตัมตามแนวสัมผัส

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท

V_n คือ ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท

V_θ คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท

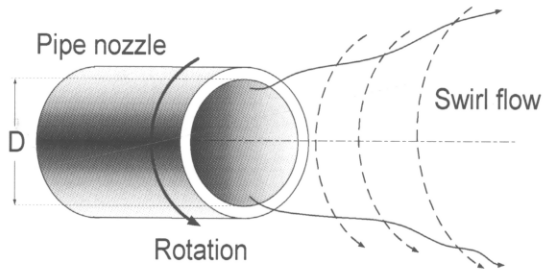
ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

r คือ พิกัดในแนวรัศมีของเจ็ท

2.5.2 ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง

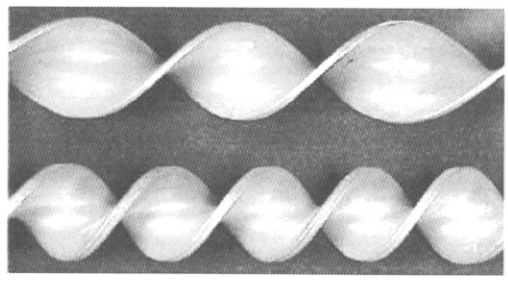
การสร้างเจ็ทหมุนควงนั้นจำเป็นต้องเพิ่มความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีจะมีโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่แตกต่างกัน

(1) วิธีการหมุนท่อเจ็ท วิธีนี้ความเร็วในการหมุนท่อเจ็ทจะมีผลต่อการเพิ่มความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท แต่เป็นวิธีที่ไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่และต้องมีอุปกรณ์หรือกลไกในการหมุนท่อเป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามข้อดีของวิธีนี้คือสามารถปรับระดับการหมุนควงของเจ็ทโดยการปรับความเร็วในการหมุนท่อ สามารถนำไปใช้งานที่เกี่ยวกับการผสมที่ต้องการปรับระดับการหมุนควงของเจ็ทที่สภาวะส่วนผสมต่างๆ



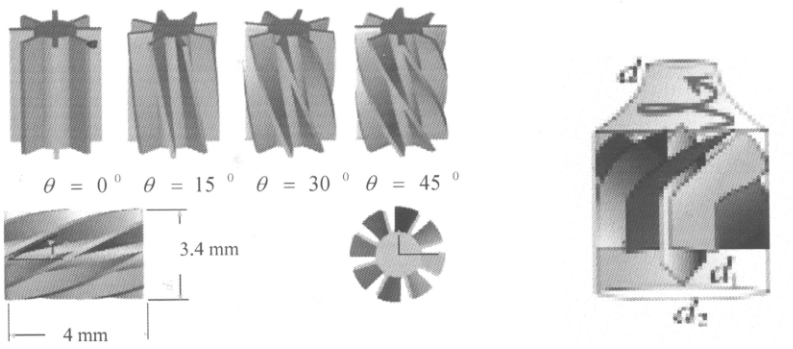
รูปที่ 2.7 การหมุนท่อเจ็ท

(2) วิธีการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท วิธีนี้จะสร้างเจ็ทหมุนควงโดยการสอดแผ่นบิดลักษณะตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8 ในท่อเจ็ท ระดับของการหมุนควงของเจ็ทจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการบิด (Twist ratio) วิธีนี้สามารถนำไปใช้ได้ง่ายเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว แต่โครงสร้างการไหลที่ปากทางออกท่อเจ็ทค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากการเกิดชั้นขอบเขตการไหลบนแผ่นบิด



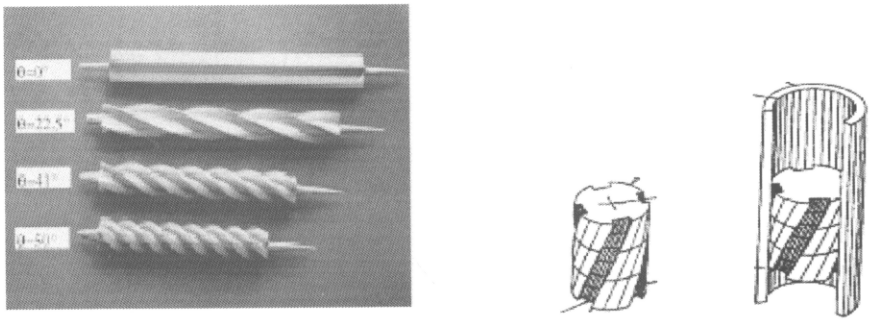
รูปที่ 2.8 แผ่นบิดที่ใช้สอดในท่อเจ็ท

(3) วิธีการติดใบพัดบังคับทิศทาง วิธีนี้จะติดใบบังคับทิศทางในบริเวณใกล้ปากทางออกของหัวฉีดตามที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งระดับของการหมุนควงของเจ็ทจะสามารถปรับเปลี่ยนตามมุมเอียงของใบพัดบังคับทิศทาง โดยปรกติจะมีใบพัดบังคับทิศทางประกอบอยู่ประมาณ 4-8 ใบ ติดตั้งที่บริเวณใกล้กับปากทางออกท่อเจ็ท



รูปที่ 2.9 ลักษณะใบพัดบังคับทิศทางติดที่ปากทางออกของเจ็ท [13 และ 14]

(4) วิธีการสอดแท่งเฮอลิคอล (Helical) วิธีนี้จะสอดแท่งเฮอลิคอลในท่อเจ็ทตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.10 กระบวนการสร้างจะคล้ายกับวิธีใช้ใบบังคับทิศทาง คือแท่งเฮอลิคอลจะทำจากแท่งทรงกระบอกตันที่ผิวถูกกัดให้เป็นร่อง ความเอียงของร่องดังกล่าวก็จะเป็นตัวกำหนดระดับของการหมุนควงของเจ็ท สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนร่องของช่องทางการไหลได้ตามความต้องการ แต่เจ็ทหมุนควงที่ได้เกิดจากการไหลที่ออกจากร่องเท่านั้น



รูปที่ 2.10 แท่งเฮอลิคอล (Helical) ที่สอดในท่อเจ็ท [11 และ 15]

เนื่องจากการสร้างเจ็ทหมุนควงแต่ละวิธี จะมีโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่แตกต่างกัน แต่จะมีคุณสมบัติที่เหมือนกันคือเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงของเจ็ทหรือสเวิร์ลนัมเบอร์แล้ว การกระจายตัวของเจ็ทจะเพิ่มมากขึ้น ระดับความปั่นป่วนภายในเจ็ทจะสูงขึ้น จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาพบว่า โครงสร้างการไหลของเจ็ทจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ดังนั้น ในการศึกษาการถ่ายเทความ

ร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชน ควรศึกษาคุณสมบัติการกระจายตัวของเจ็ทหมุนควงหรือโครงสร้างการไหลของเจ็ทของแต่ละวิธีที่เลือกใช้เพื่อให้สามารถเข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควง

2.6 สมการพื้นฐานที่ใช้ในคำนวณการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน

ในกรณีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทพุ่งชนจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ สำหรับสมการพื้นฐานในการคิดอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนบนพื้นผิวคือ

$$\dot{Q} = hA(T_{\infty} - T_{w}) \tag{2.4}$$

$$\dot{Q} = hA(T_{w} - T_{\infty}) \tag{2.5}$$

ในที่นี้ $\dot{Q}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

T_{∞} คือ อุณหภูมิของของไหล

T_{w} คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

สมการ (2.4) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่ามากว่าอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและสมการ (2.5) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ได้แสดงในสมการ (2.4) และ (2.5) จะขึ้นอยู่กับสภาวะการถ่ายเทความร้อนในขณะนั้น อย่างเช่น อัตราการไหล ขนาดความกว้างของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลและคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่สามารถหาฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนก็สามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}}{T_{\infty} - T_{w}} \tag{2.6}$$

$$h = \frac{\dot{q}}{T_{w} - T_{\infty}} \tag{2.7}$$

ในที่นี้ $\dot{q}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว

สมการ (2.6) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่ามากว่าอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและสมการ (2.7) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับที่สามารถนำมาวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติคือค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hD}{k} \tag{2.8}$$

ในที่นี้ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท

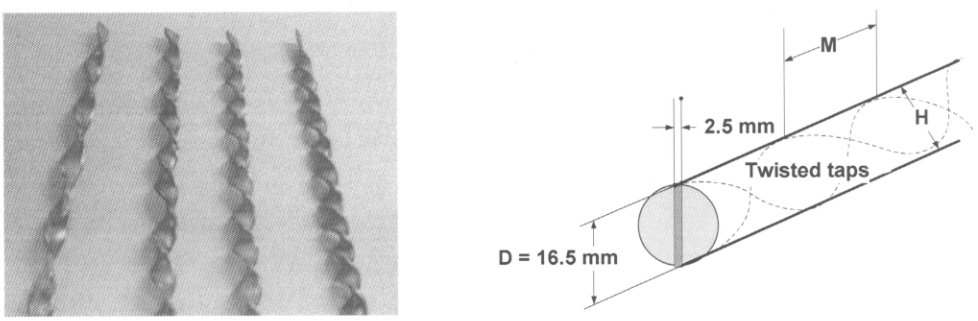
k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

บทที่ 3
ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง จากนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดของชุดทดลองและเงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนแรกเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลและการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน์ เพื่อดูลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่ปากทางออกและอธิบายกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควง

3.1 วิธีการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง

สำหรับการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การหมุนท่อเจ็ท การติดใบบังคับทิศทางที่ปากทางออกของท่อเจ็ท การสอดแท่งเฮอลิคอลหรือแผ่นบิดในท่อเจ็ท ตามที่ได้กล่าวในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5 สำหรับในงานวิจัยนี้ได้สร้างเจ็ทหมุนควงโดยใช้วิธีสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท ซึ่งสาเหตุที่เลือกวิธีดังกล่าว เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถสร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อนและยังมีข้อดีคือไม่มีอุปกรณ์เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับการสร้างเจ็ทหมุนควงด้วยวิธีการหมุนท่อเจ็ท



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท

รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะของแผ่นบิดที่สอดในท่อเจ็ท แผ่นบิดทำมาจากแผ่นสเตนเลสแบนมีความหนา 2.5 mm ความกว้าง 16.5 mm และมีความยาวหลังจากที่ได้บิดเกลียวแล้ว 300 mm บิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยสอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิดสอดในลักษณะเสมอกับปากทางออกของท่อเจ็ท และในทุกการทดลองได้กำหนดให้สันของแผ่นบิดที่ตำแหน่งปลายท่อเจ็ทอยู่ในตำแหน่งแนวดิ่งดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับแผ่นบิดที่สร้างขึ้นได้กำหนดอัตราส่วนการบิด (Twist ratio) อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$Twist\ ratio = \frac{M}{H} \tag{3.1}$$

โดยที่นี้ M คือ ความยาวของเกลียว

H คือ ความสูงแผ่นบิด

สำหรับระดับของการหมุนควงของเจ็ทสามารถแสดงในรูปของสเวิร์ลนัมเบอร์โดยใช้สมการ (2.1) – (2.3) แต่เนื่องจากอิทธิพลของแผ่นบิดในท่อทำให้การไหลที่ปากทางออกซับซ้อน เพราะเกิดชั้นขอบเขตการไหลบริเวณใกล้ผนังท่อเจ็ทและผิวแผ่นบิด ทำให้ความเร็วในแนวแกนและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดที่ทางออกของท่อเจ็ท และในทางปฏิบัติยากต่อการวัดการกระจายความเร็วที่ปากทางออก ดังนั้นในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานความเร็วในแนวแกน (V_n) และความเร็วเชิงมุม (ω) ของเจ็ทคงที่ตลอดที่ทางออกของท่อเจ็ท โดยที่สามารถคำนวณหาความเร็วเชิงมุมของเจ็ทตามสมการต่อไปนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \tag{3.2}$$

ในที่นี้ n คือ จำนวนเกลียว

l คือ ความยาวแผ่นบิด

V_n คือ ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท

จากสมการ (2.2) และ (2.3)

$$G_n = \int_0^{D/2} \rho V_n^2 \cdot (2\pi r dr) = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \tag{3.3}$$

$$G_\theta = \int_0^{D/2} \rho V_n V_\theta r \cdot (2\pi r dr) = 2\pi \int_0^R \rho V_n V_\theta r^2 dr = \frac{\pi \rho V_n \omega R^4}{2} \tag{3.4}$$

ในที่นี้ V_θ คือ ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท

ρ คือ ความหนาแน่นของเจ็ท

r คือ พิกัดในแนวรัศมีของเจ็ท

R คือ รัศมีของท่อเจ็ท (R=D/2)

จากสมการ (2.1) จะได้ความสัมพันธ์ของสเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number, Sw) ดังนี้

$$Sw = \frac{\pi nD}{2l} \tag{3.5}$$

จากสมการ (3.5) พบว่าสเวิร์ลนัมเบอร์ไม่ขึ้นกับความเร็วของเจ็ท แต่อย่างไรก็ตามสมการความสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้นนี้ได้มาจากสมมุติฐาน ซึ่งเป็นค่าประมาณทางทฤษฎีเท่านั้นสำหรับสเวิลนัมเบอร์จริงนั้นจำเป็นต้องหาจากการวัดการกระจายความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ ที่ปากทางออกของท่อเจ็ท ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนเกลียวที่ความยาวของแผ่นบิด 300 mm ค่าประมาณทางทฤษฎีของสเวิร์ลนัมเบอร์และอัตราส่วนการบิด (Twist ratio)

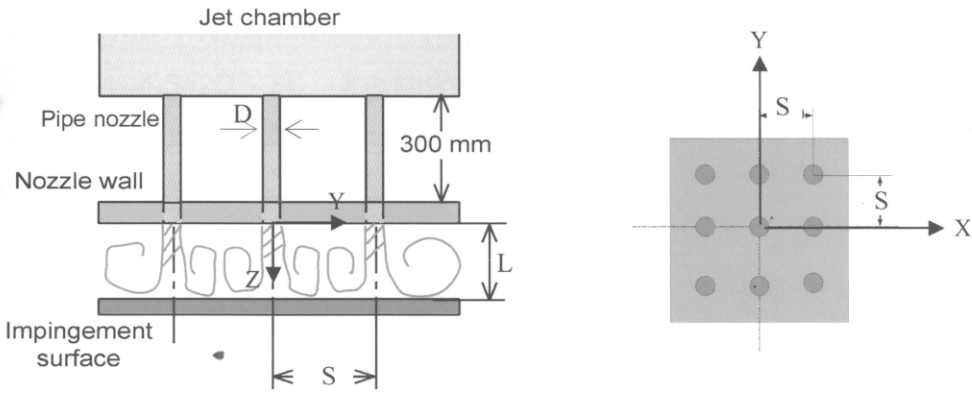
ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนเกลียวที่ความยาวของแผ่นบิด 300 mm สเวิร์ลนัมเบอร์และอัตราส่วนการบิดของแต่ละแผ่นบิด

Number of pitch (l=300mm)	Swirl number	Twist ratio
0	0.00	0.00
5	0.40	3.64
8	0.62	2.27
10	0.78	1.82
12	0.94	1.52

3.2 รายละเอียดของชุดทดลอง

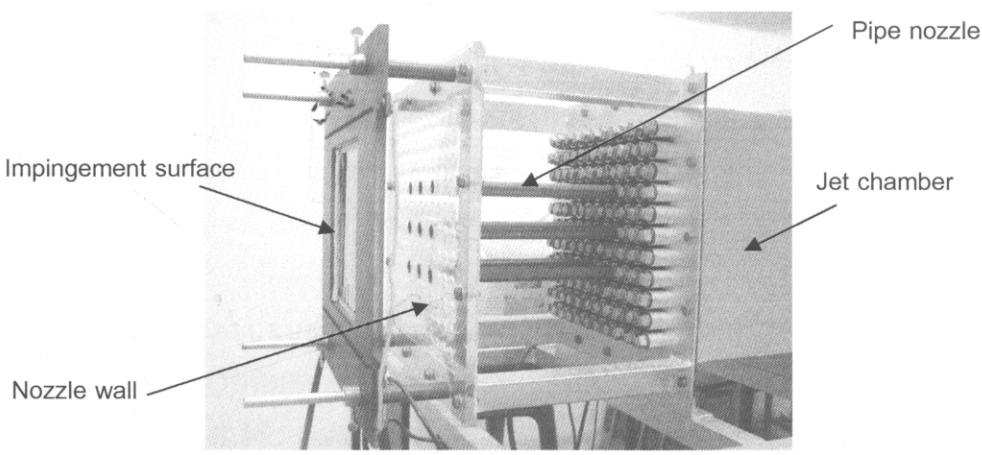
รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองและตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกรณีที่เป็นกลุ่มของเจ็ท 9 ท่อ โดยกำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัด แกน X อยู่ในแนวตั้งฉากกับสันของแผ่นบิด แกน Y อยู่ในแนวเดียวกับที่เจ็ทไหลออกจากท่อ และแกน Z อยู่ในแนวเดียวกับสันของแผ่นบิด สำหรับชุดทดลองสามารถปรับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทได้ตามที่แสดงในรูปที่ 3.3

สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท D=16.5 mm ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, 8D และ 10D ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D, 4D, 6D และ 8D สเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.00, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94 และเจ็ทจากท่อเปล่า ในกรณีการทดลองเจ็ทลำเดียวจะใช้ท่อเจ็ทที่อยู่ตรงกลางเป็นหลักโดยนำท่อเจ็ทที่เหลือออกจากชุดทดลอง จากนั้นจึงทำการปิดรูตำแหน่งที่นำท่อเจ็ทออกด้วยการนำฝาปิดขัน เปลียวให้แน่น สำหรับการทดลองกรณีที่เป็นเจ็ทหมุนควงก็จะนำแผ่นบิดที่มีอัตราส่วนการบิดที่ค่าต่างๆสอดในท่อเจ็ท และนำท่อเจ็ทที่ได้สอดแผ่นบิดมาติดตั้งกับชุดทดลอง



(ก) โมเดลชุดทดลอง (ข) ลักษณะการจัดเรียงท่อเจ็ท

รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลอง



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของชุดทดลอง

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (D)	16.5 mm
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)	20,000
อุณหภูมิเจ็ท (T_j)	28.5 $^{\circ}$C
สเวิร์ลนัมเบอร์ (Sw)	0.00, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94 และ เจ็ทจากท่อเปล่า
ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L)	2D, 4D, 6D, 8D และ 10D
ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S)	2D, 4D, 6D และ 8D

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง สำหรับตัวแปรระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เลือกใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง L=2D – 10D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทอยู่ในช่วง S=2D – 8D สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองได้เลือกค่าที่อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเพียงค่าเดียว เนื่องจากในงานวิจัยไม่ได้ศึกษาผลของตัวแปรเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ท

3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

3.3.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 3.4 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชน สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

(1) โบลเวอร์ (Blower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป่าอากาศให้เกิดการไหลในระบบโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 5 hp เป็นตัวขับใบพัดของโบลเวอร์ ซึ่งขนาดของกำลังที่ขับโบลเวอร์เพียงพอต่ออัตราการไหลในกรณีที่เป็นกลุ่มของเจ็ท 9 ท่อ สำหรับการปรับอัตราการไหลให้ได้ตามที่กำหนดจะใช้วิธีการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุม

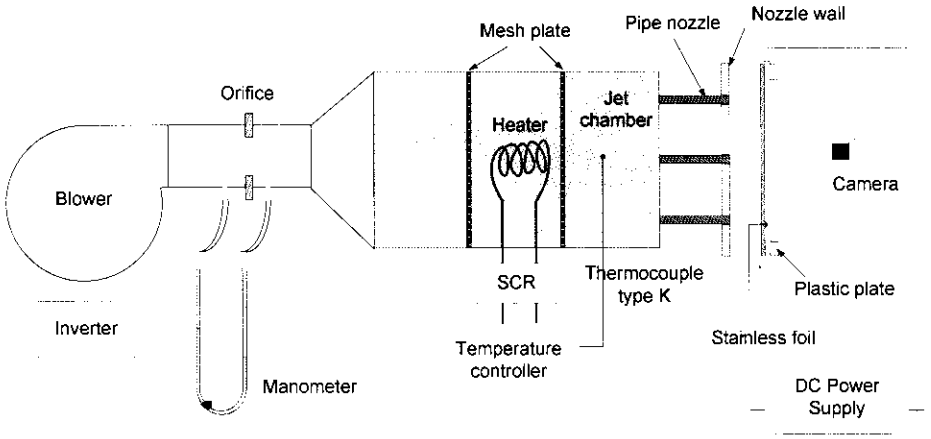
(2) ออร์ริฟิส (Orifice) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศจากผลต่างความดันสองจุด คือความดันของอากาศก่อนผ่านออร์ริฟิสและหลังผ่านออร์ริฟิส โดยใช้มานอมิเตอร์ที่บรรจุน้ำเป็นของเหลววัดความดัน

(3) ฮีดเตอร์และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Heater and Temperature controller) เป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศและควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทให้คงที่ ในการทดลองใช้ฮีดเตอร์เป็นตัวให้ความร้อน จากนั้นทำการควบคุมฮีดเตอร์ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ได้อยู่ในช่วง ± 0.2 $^{\circ}$C

(4) ห้องกักอากาศ (Jet chamber) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อเก็บรักษาความดันของอากาศให้คงที่ตลอดหน้าแปลนที่ติดตั้งท่อเจ็ท โดยด้านหน้าของห้องความดันจะติดตั้งข้อต่อเกลียวในไว้สำหรับติดตั้งท่อเจ็ทซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 11 แถว × 11 แถว โดยที่ระยะห่างของข้อต่อเกลียวแต่ละอันที่วัดจากศูนย์กลางมีความกว้าง 2D (D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ทมีขนาด 16.5 mm) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.3

(5) ท่อเจ็ท (Pipe nozzle) ทำจากท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16.5 mm ความยาวท่อ 300 mm ภายในท่อจะติดตั้งแผ่นบิดเพื่อสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง

(6) ผนังหัวฉีด (Nozzle wall) ติดตั้งขึ้นมาเพื่อจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิวให้อยู่ระหว่างผนังหัวฉีดและพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3.4 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

(7) แผ่นที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement plate) ในการทดลองจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.03 mm เป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยแผ่นสเตนเลสจะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 240 mm x 240 mm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองจะต่อเข้ากับขั้วของอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{A} \tag{3.6}$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสเตนเลส

A คือ พื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส

สำหรับการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลติดด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสี จากไม่มีสี (สีดำ) เปลี่ยนเป็นสีแดง เหลือง เขียว และน้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ 29-36 $^{\circ}$C

(8) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายไฟกระแสตรง (DC) ให้กับแผ่นสเตนเลสเพื่อให้เกิดฟลักซ์ความร้อนขึ้น โดยสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 43 A และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 15 V

(9) กล้องบันทึกภาพแบบดิจิตอล (Digital camera) สามารถบันทึกความละเอียดของภาพ 640 × 480 จุด มีความละเอียดของสี 8 บิต

3.3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับโบลเวอร์เพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่กำหนดโดยใช้ออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล จากนั้นอากาศจะไหลผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าห้องความดัน และอากาศจะไหลออกมาทางท่อหัวฉีดพุ่งชนผนังที่ติดตั้งไว้ด้านหน้า หลังจากนั้นเจ็ทก็จะไหลออกทางด้านข้างระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับค่าเรย์โนล์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\mathrm{Re} = \frac{D\overline{V}_j}{\nu} \tag{3.7}$$

โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท

$\overline{V}_j$ คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อเจ็ท

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของเจ็ท

ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน โดยการจ่ายฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นสเตนเลสสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.6) หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการระบายความร้อนขึ้นบนแผ่นสเตนเลสทำให้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ติดด้านหลังแผ่นสเตนเลสเกิดการเปลี่ยนสี จากนั้นทำการบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน(h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_j} \tag{3.8}$$

โดยที่ $\dot{q}$ คือ ฟลักซ์ความร้อน

T_w คือ อุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนที่วัดจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

T_j คือ อุณหภูมิของเจ็ท

จากสมการที่ (3.8) สามารถคำนวณหานัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวได้จากความสัมพันธ์

$$Nu = \frac{hD}{k} \tag{3.9}$$

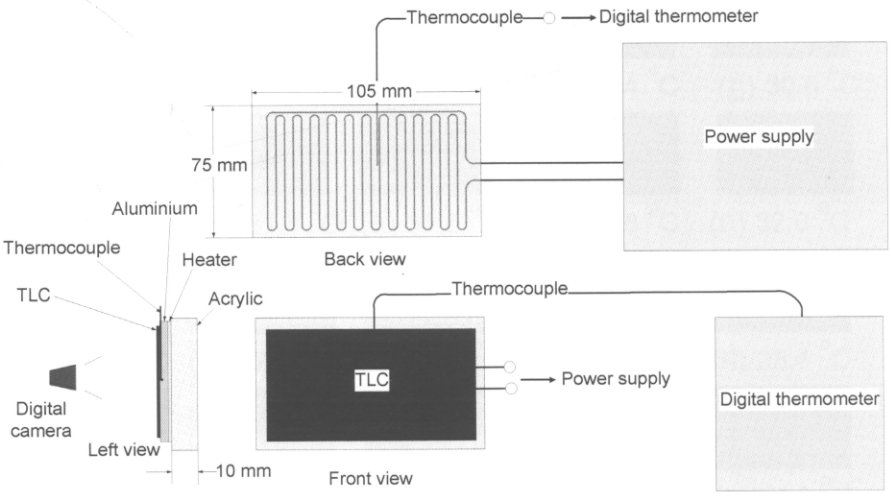
ในที่นี้ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

สำหรับเส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะเป็นเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิหรือเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm) และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (3.8) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากัน

แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่เลือกใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจาก ไม่มีสี (สีดำ) สีแดง สีเหลือง สีเขียวและสีน้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ 29 °C ถึง 36 °C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลและได้ใช้เทคนิคการประมวลภาพในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิตอลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก คือ R (แดง) G (เขียว) และ B (น้ำเงิน) เพื่อเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการประมาณค่าอุณหภูมิจากสีที่ปรากฏขึ้น ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.3.3 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

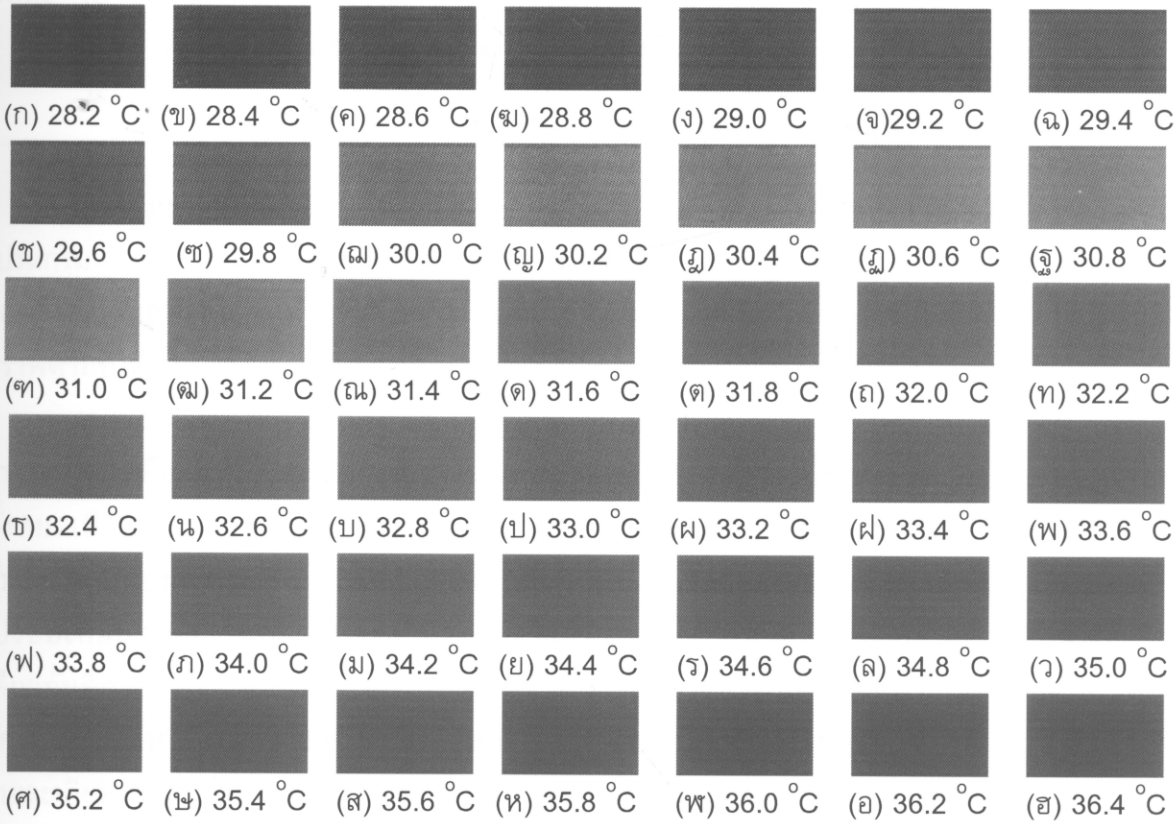


รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

ในการใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว จำเป็นที่จะต้องทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลก่อนใช้งาน รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีดเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใสมีขนาดความกว้าง 75 mm ยาว 105 mm และหนา 10 mm ขั้วของฮีดเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีดเตอร์จะติดแผ่นอลูมีเนียมบางซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีดเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอลูมีเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่มีขนาดความกว้าง 47 mm ยาว 70 mm เพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะ

ติดตั้งกล้องดิจิตอลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล สำหรับแผ่นอลูมีเนียมได้เซาะร่องสำหรับติดสายเทอร์โมคับเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีนั้นได้กำหนดเงื่อนไขให้เหมือนกับสภาวะในการทดลองจริง เช่น การให้แสงและระยะห่างของกล้องบันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 28.2 – 36.4 °C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม

สำหรับขั้นตอนในการสอบเทียบสีนั้นได้จัดอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาพเดียวกับการทดลองจากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับฮีดเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิบนแผ่นอลูมีเนียมเท่ากับ 38 °C ซึ่งแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะแสดงสีน้ำเงินเข้ม จากนั้นรอให้อุณหภูมิบนแผ่นอลูมีเนียมมีค่าคงที่ จึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6 (ฮ) และทำซ้ำลักษณะเดียวกันโดยลดอุณหภูมิบนแผ่นอลูมีเนียมลงครั้งละ 0.2 °C จนถึงอุณหภูมิที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี (สีดำ) โดยรูปที่ 3.6 แสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ได้จากการสอบเทียบอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.6 แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบสีแต่ละภาพมาแยกให้อยู่ในระบบสี RGB จากนั้นวิเคราะห์ให้อยู่ในรูประบบสี HIS ตามสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{cases} \frac{1}{360}\left[90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right)\right] & For \quad G > B \\ \frac{1}{360}\left[90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right) + 180\right] & For \quad G < B \end{cases} \tag{3.10}$$

$$F = \frac{2R - G - B}{G - B} \quad For \quad G \neq B$$

$$F = R \quad For \quad G = B$$

$$I = \frac{R + G + B}{3} \tag{3.11}$$

$$S = 1 - \left[\frac{\min(R, G, B)}{I}\right] \tag{3.12}$$

ในที่นี้ R คือ ความเข้มของสีแดงของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

G คือ ความเข้มของสีเขียวของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

B คือ ความเข้มของสีน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

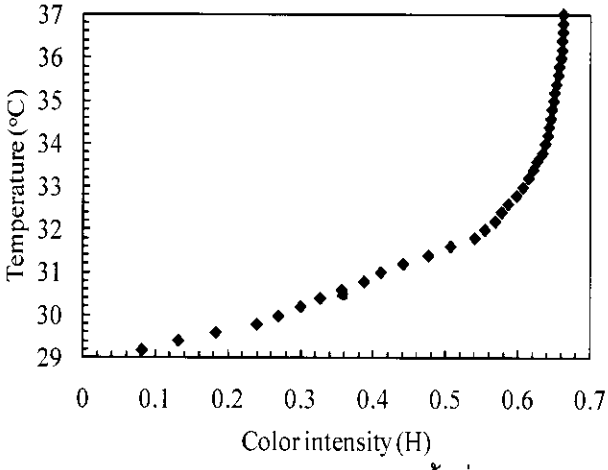
จากสมการที่ (3.10) - (3.12) สามารถหาค่าเฉลี่ยความเข้มของสีในรูป 4.6 ทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม MATLAB® ตามที่ได้แสดงในภาพผนวก ภช. 1 จากนั้นสร้างกราฟโดยให้แกนนอนแสดงระดับของความเข้มสีที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ H และแกนตั้งแสดงระดับของอุณหภูมิจะได้ความสัมพันธ์ของกราฟตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตัวประกอบสี H ที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการสอบเทียบสีทั้งหมด 6 ครั้ง จากนั้นนำมาหาค่าตัวประกอบสีเฉลี่ย H_{ave} ที่ได้จากการสอบเทียบสีทั้งหมดเทียบกับอุณหภูมิตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับรูปที่ 3.9 แสดงผลที่ได้จากการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลที่ใช้ในงานวิจัยของ Geers และคณะ [19] จากการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 3.8 และ 3.9 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟเป็นไปในทางเดียวกันคือ ค่า H เพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ แต่ในการณีที่พิจารณารายละเอียดของลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกราฟทั้งสองพบว่า มีความแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งอาจจะเกิดจากรายละเอียดของสูตรในการผลิตสารเทอร์โมโครมิคของแต่ละผู้ผลิตมีความแตกต่างกัน

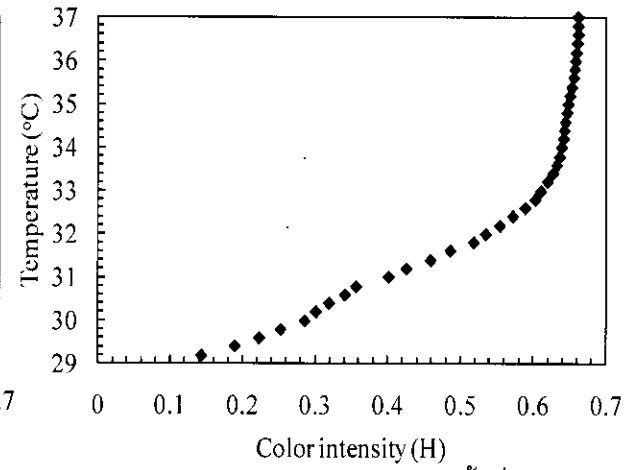
จากรูปที่ 3.8 สามารถหาสมการที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบสีเฉลี่ย H_{ave} กับอุณหภูมิ T อยู่ในรูปของสมการ

$$T = 22183H_{ave}^{6} - 4933H_{ave}^{5} + 43913H_{ave}^{4} - 19914H_{ave}^{3} + 4829H_{ave}^{2} - 584.5H_{ave} + 56.62 \tag{3.13}$$

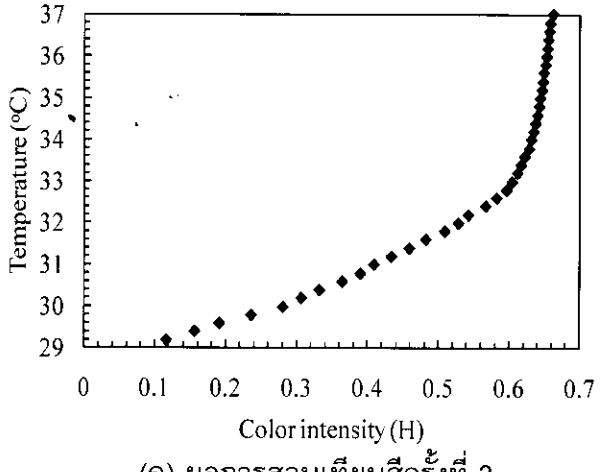
จากสมการ (3.13) สามารถที่จะคำนวณหาอุณหภูมิของแต่ละจุดภาพ (Pixel) ที่มีเงื่อนไขค่า H ต่างๆ โดยอุณหภูมิจะต้องจำกัดอยู่ในช่วง $29^{o}C \leq T \leq 37^{o}C$ เท่านั้น



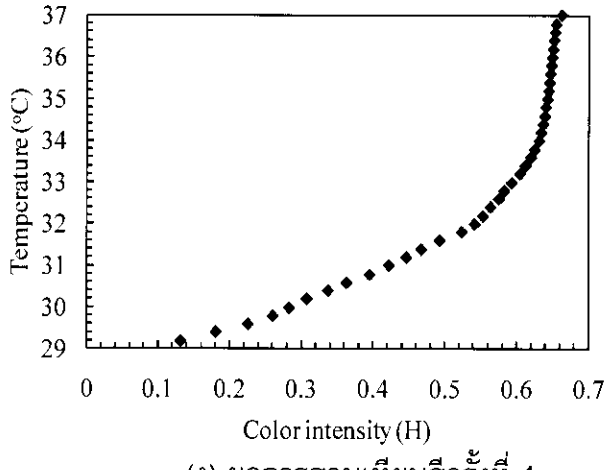
(ก) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 1



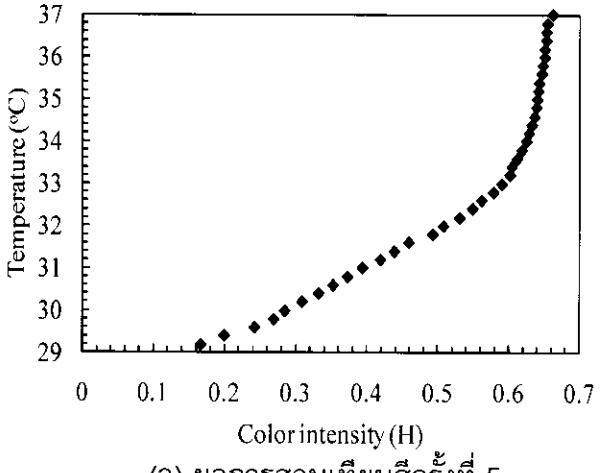
(ข) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 2



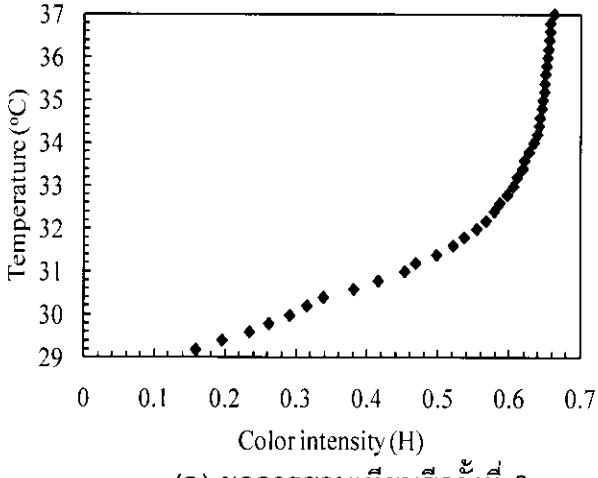
(ค) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 3



(ง) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 4

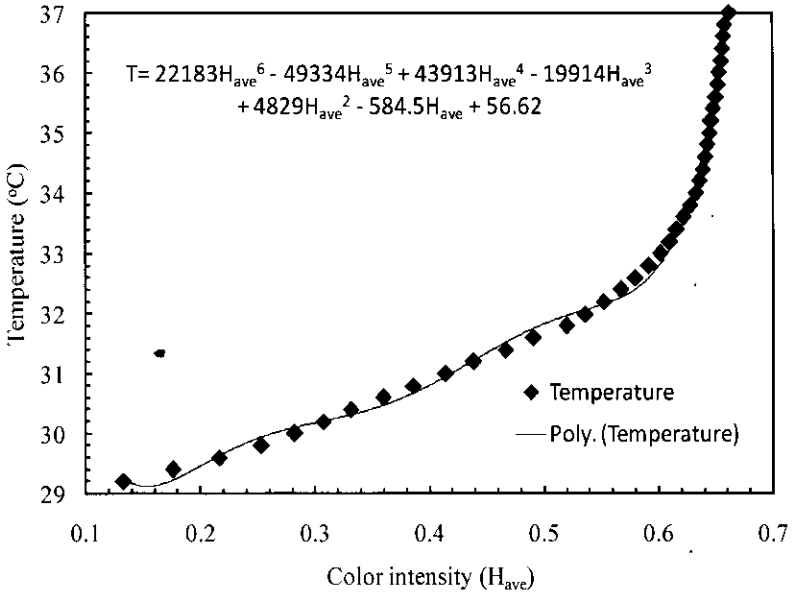


(จ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 5

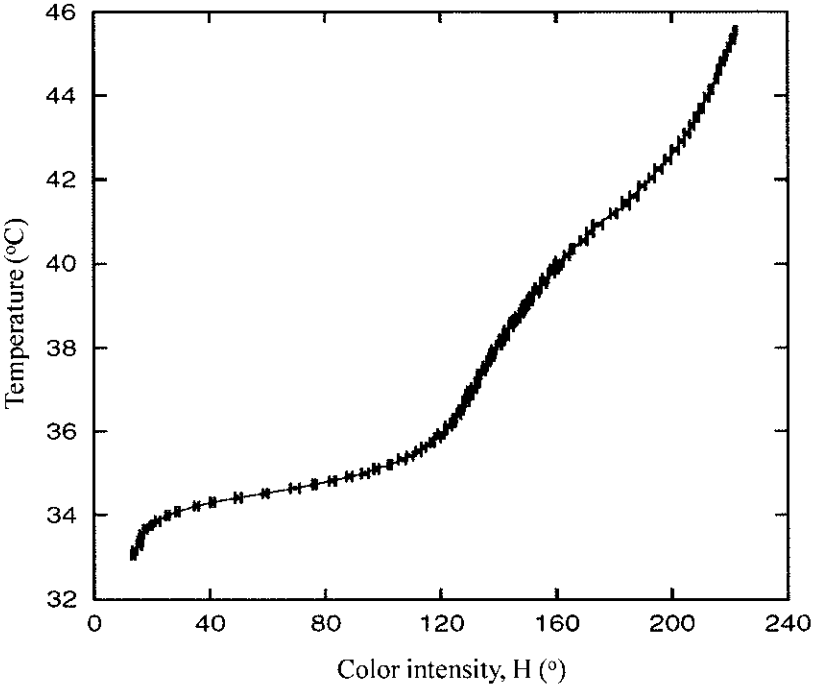


(ฉ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 6

รูปที่ 3.7 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสี H จากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ตัวประกอบสีของค่าเฉลี่ย H_{ave} ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.9 แสดงผลการสอบเทียบสีของ Geer และคณะ [19]

4.3.4 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

ในการหาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สามารถนำรูปที่ได้จากการถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล ทำการวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB® สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพมีรายละเอียดดังนี้

(1) เลือกรูปการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยเงื่อนไขการแสดงสีในรูปคาดว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ $29^{o}C \le T \le 37^{o}C$

(2) โหลดรูปถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์

(3) ตัดรูปให้เหลือเฉพาะส่วนที่แสดงเป็นภาพสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

(4) วิเคราะห์รูปแต่ละจุดภาพที่มีค่า H อยู่ในช่วง $29^{o}C \le T \le 37^{o}C$ ในกรณีที่ ค่า T อยู่ในช่วงดังกล่าวก็จะทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป แต่ในกรณีที่ค่า T ไม่ได้อยู่ในช่วงดังกล่าวก็จะต้องทำการเลือกภาพใหม่ที่มีฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่มีค่าต่ำหรือสูงกว่ารูปที่กำลังทำการวิเคราะห์ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการของค่า H ที่ทำให้ค่า T อยู่ในช่วง $29^{o}C \le T \le 37^{o}C$

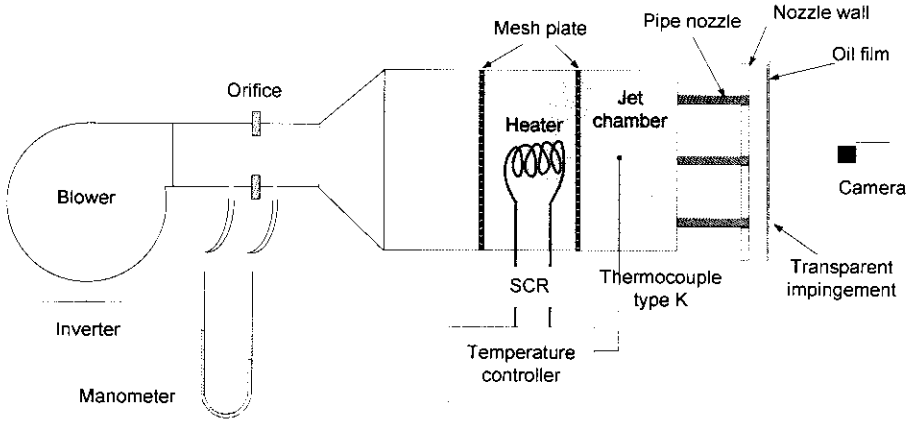
(5) ทำการเลือกจุดภาพที่ 1 แล้วทำการแทนค่า H ของจุดภาพดังกล่าวลงในสมการที่ (3.13) ซึ่งจะได้จุดภาพดังกล่าวเป็นค่า T ตามสมการ

(6) จากจุดภาพที่ 1 ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h จากสมการที่ (3.8) และคำนวณค่านัสเซิลต์นัมเบอร์จากสมการที่ (3.9)

(7) เลื่อนจุดภาพเป็นจุดที่ 2, 3 และ 4 จนหมดรูป โดยแต่ละจุดภาพทำตามขั้นตอนที่ (5)-(6) ซึ่งจากนี้จะได้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายทั่วทั้งพื้นผิวที่ทำการวิเคราะห์

3.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวเทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film)

รูปที่ 3.10 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิว ได้นำชุดทดลองเดิมที่ใช้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวมาประยุกต์ใช้ โดยเปลี่ยนแผ่นที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งจากเดิมเป็นแผ่นสเตนเลสบางมาเป็นแผ่นผลาสติกใส เพื่อทาฟิล์มน้ำมันบาง ๆ บนแผ่นพลาสติกใสด้านที่เจ็ทพุ่งชน เมื่อเจ็ทไหลพุ่งชนฟิล์มน้ำมันก็จะเกิดการไหลบนพื้นผิว ทำให้สามารถเห็นลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้



รูปที่ 3.10 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิว

ในการทดลองได้นำแผ่นพลาสติกใสด้านที่เจ็ทพุ่งชนทาด้วยน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลว ผงไททาเนียมไดออกไซด์และกรดโอลิกเป็นฟิล์มบาง ๆทั่วทั้งพื้นผิว จากนั้นจึงนำแผ่นพลาสติกใสมาติดตั้งเข้ากับชุดทดลองเป็นระนาบที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับผนังด้านที่เจ็ทพุ่งชนได้ทาสีดำเพื่อให้สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพัดพาฟิล์มน้ำมันออกจากพื้นผิวได้ชัดเจน หลังจากที่เจ็ทเริ่มไหลพุ่งชนฟิล์มน้ำมันก็จะทำการบันทึกภาพการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวจากด้านหลังของแผ่นพลาสติกใสโดยใช้กล้องดิจิตอลบันทึกการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่าง ๆ

3.5 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน์

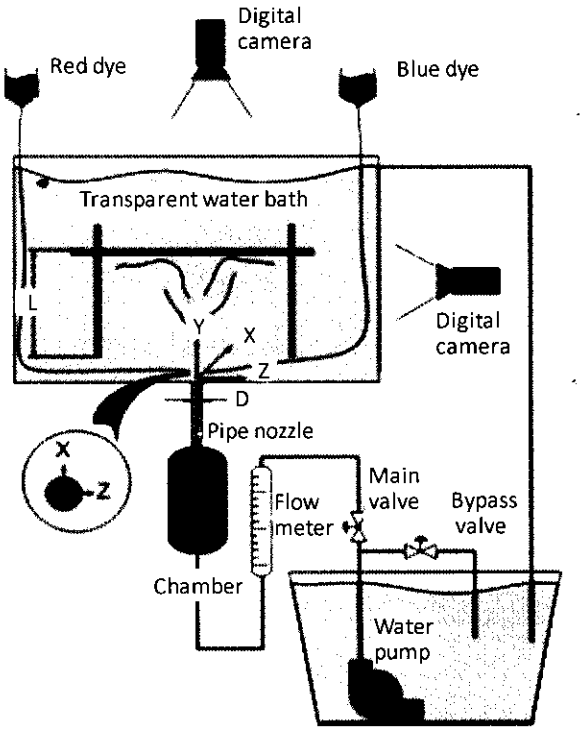
สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำผลจากการศึกษามาใช้ในการอธิบายลักษณะโครงสร้างการไหลและกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควง โดยเลือกเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re=760 ซึ่งเป็นช่วงความเร็วในการไหลของเจ็ทที่สามารถสังเกตลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทได้ชัดเจน และไม่ทำให้เส้นสีที่ฉีดเข้าไปในกระแสการไหลที่ตำแหน่งปากทางออกของท่อเจ็ทเกิดการแตกตัว สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำได้แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (D)	16.5 mm
เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)	760
อุณหภูมิเจ็ท (T_j)	30 $^{\circ}$C
สเวิร์ลนัมเบอร์ (Sw)	0.00, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94 และ เจ็ทจากท่อเปล่า
ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L)	2D, 4D, 6D, 8D และ 10D

รูปที่ 3.11 แสดงชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ โดยตู้น้ำที่ใช้ในการศึกษาทำจากแผ่นพลาสติกใสเพื่อให้สามารถสังเกตการไหลของเจ็ทน้ำได้ มีขนาดความกว้าง 60 cm ยาว 62 cm และสูง 50 cm ในการทดลองเจ็ทน้ำจะถูกส่งจากถังเก็บน้ำด้านล่างโดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 250 วัตต์ หลังจากนั้นน้ำจะไหลผ่านวาล์วปรับอัตราการไหลและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบลูกลอยไปยังถังพักน้ำและท่อเจ็ท โดยเจ็ทน้ำจะไหลออกจากท่อเจ็ทที่ต่อเข้ากับบริเวณตรงกลางของผนังด้านล่างของตู้น้ำ โดยท่อเจ็ทที่ใช้มีขนาดเท่ากับกรณีที่ใช้ศึกษาเจ็ทอากาศ ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจะติดตั้งแผ่นเรียบที่ทำจากแผ่นพลาสติกใสหนา 10 mm เหนือปากทางออกของท่อเจ็ท โดยที่แผ่นเรียบที่ใช้สำหรับเป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสามารถปรับระยะห่างจากปากทางออกข้างเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) และเมื่อต้องการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระจะนำแผ่นพลาสติกที่เจ็ท

พุ่งชนออกจากตู้น้ำ จากรูปที่ 3.11 กำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัด และให้แกน X อยู่ในแนวตั้งฉากกับสันของแผ่นบิด แกน Y อยู่ในแนวเดียวกับที่เจ็ทไหลออกจากท่อ และแกน Z อยู่ในแนวเดียวกับสันของแผ่นบิด

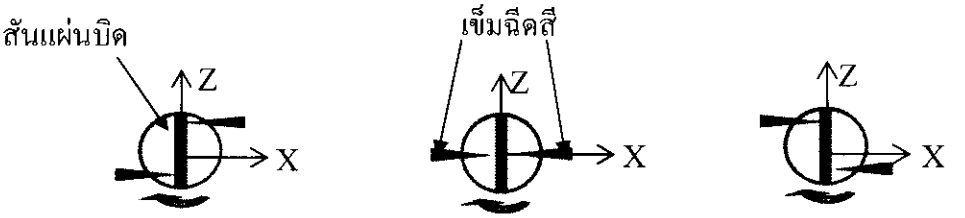


รูปที่ 3.11 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน์

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน์ จะแบ่งเป็นสองวิธีคือ วิธีแรกศึกษาลักษณะการกระจายของเจ็ท โดยใช้วิธีผสมสีชมพูแดงลงไปในถังน้ำด้านล่างของชุดทดลองแล้วฉีดเจ็ทที่มีสีชมพูแดงลงไปในน้ำใสที่อยู่ในตู้น้ำ ซึ่งวิธีนี้จะสังเกตได้เพียงลักษณะการกระจายของเจ็ทเท่านั้น ส่วนวิธีที่สองศึกษาลักษณะโครงสร้างการไหลภายในเจ็ท โดยวางเข็มฉีดสีที่ตำแหน่งปากทางออกของท่อเจ็ท แล้วดูดน้ำใสจากถังน้ำด้านล่างของชุดทดลองและฉีดเจ็ทน้ำลงไปในน้ำใสที่อยู่ในตู้น้ำ จากนั้นก็ฉีดสีเข้าไปในกระแสการไหลของเจ็ทน้ำที่ปากทางออก แล้วดูเส้นทางการไหลของสีในกระแสการไหลของเจ็ท กรณีที่ต้องการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระก็จะนำแผ่นพลาสติกใสที่ใช้สำหรับเจ็ทพุ่งชนออกในการทดลองได้วางเข็มฉีดสี 3 ลักษณะที่ปากทางออกของท่อเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในการติดตามดูเส้นทางการไหลของสีในแต่ละด้าน (ด้านซ้ายและด้านขวาระหว่างแผ่นบิดที่ปากทางออกของท่อเจ็ท) ได้ใช้สีที่ฉีดเข้าไปในแต่ละด้านที่แตกต่างกัน โดยเข็มที่อยู่ด้านขวาจะใช้สีชมพูแดงและเข็มที่อยู่ด้านซ้ายจะใช้สีน้ำเงิน

สำหรับชุดทดลองการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ ได้ติดตั้งกล้องบันทึกภาพแบบดิจิตอลและหลอดไฟให้แสงสว่างโดยตำแหน่งการติดตั้งกล้องบันทึกภาพมีอยู่สองตำแหน่ง คือด้านข้างและ

ด้านบนของตู้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยที่ตำแหน่งของกล้องที่อยู่ด้านข้างจะจับภาพการไหลของเจ็ทตามแนวแกน และกล้องที่อยู่ด้านบนจะจับภาพการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

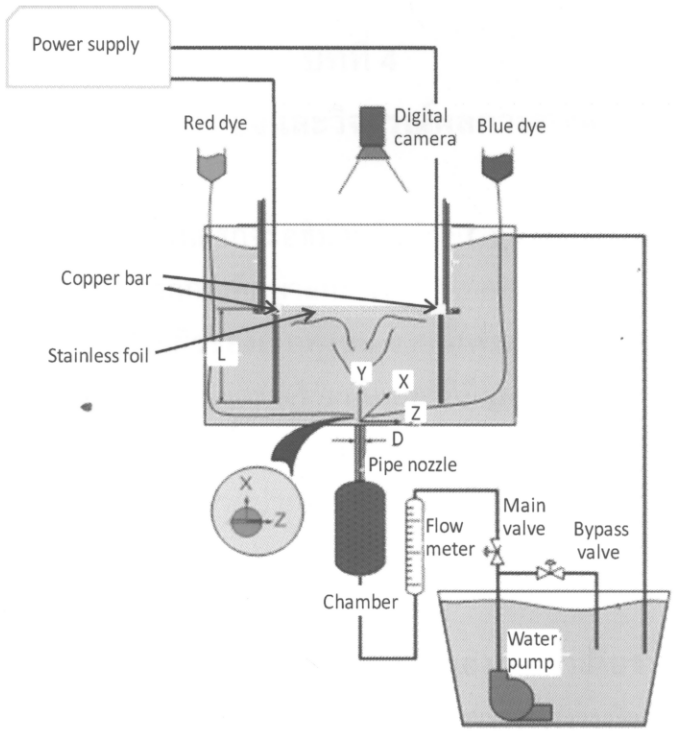


(ก) ตำแหน่ง A (ข) ตำแหน่ง B (ค) ตำแหน่ง C

รูปที่ 3.12 ลักษณะการวางเข็มสีที่ปากทางออกของท่อเจ็ทแต่ละแบบ

3.6 การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว

รูปที่ 3.13 แสดงชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว โดยใช้ชุดทดลองชุดเดิมที่ได้ใช้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน์ โดยเปลี่ยนผนังที่เจ็ทพุ่งชนจากแผ่นเรียบธรรมดาเป็นกล่องสี่เหลี่ยมกันน้ำ โดยด้านล่างของกล่องสี่เหลี่ยมเป็นพื้นผิวใช้สำหรับเจ็ทพุ่งชนซึ่งเจาะหน้าต่างขนาด 200 mm x 200 mm ไว้กลางแผ่น และใช้แผ่นสเตนเลสบางที่มีความหนา 0.03 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสเตนเลสจะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนาที่เจาะหน้าต่าง โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองจะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟกระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส สำหรับขั้นตอนการทดลองจะเหมือนกับการทดลองการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศ



รูปที่ 3.13 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

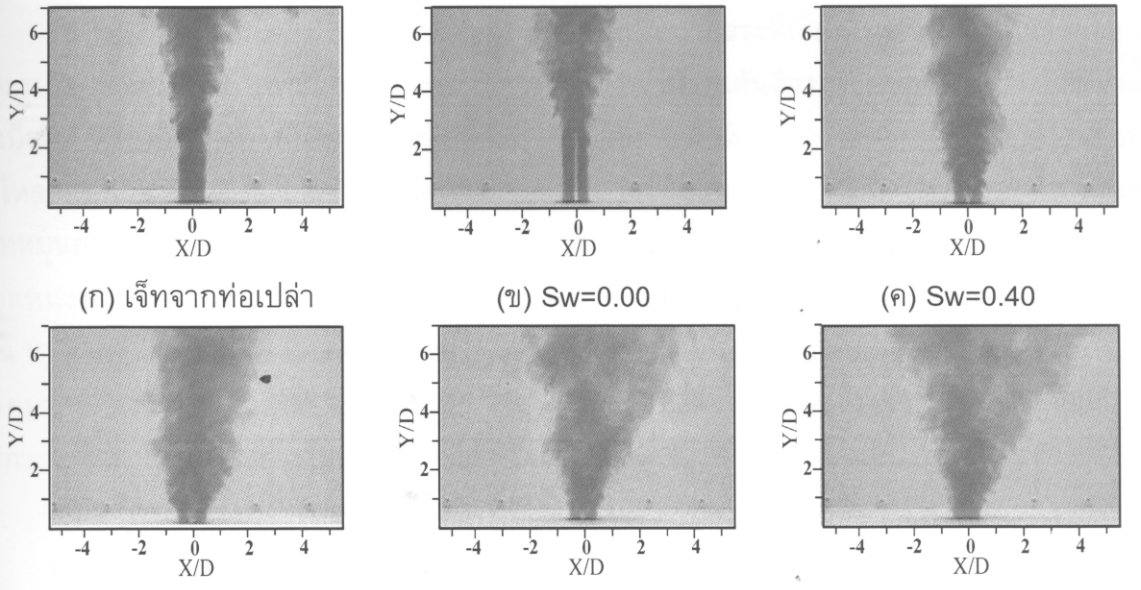
สำหรับผลการทดลองในส่วนแรกจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว โดยนำผลจากการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทในน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน์มาอธิบายกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน จากนั้นจะอธิบายถึงผลกระทบจากระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทผิวพุ่งชนและสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ ในส่วนที่สองจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท และอธิบายถึงผลกระทบจากระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทและสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

4.1 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว

สำหรับหัวหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว โดยในส่วนแรกจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ เพื่อให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควง จากนั้นจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ และสุดท้ายจะเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทน้ำและเจ็ทอากาศ เพื่ออธิบายกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทน้ำและเจ็ทอากาศที่มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสอดคล้องกัน

4.1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระ

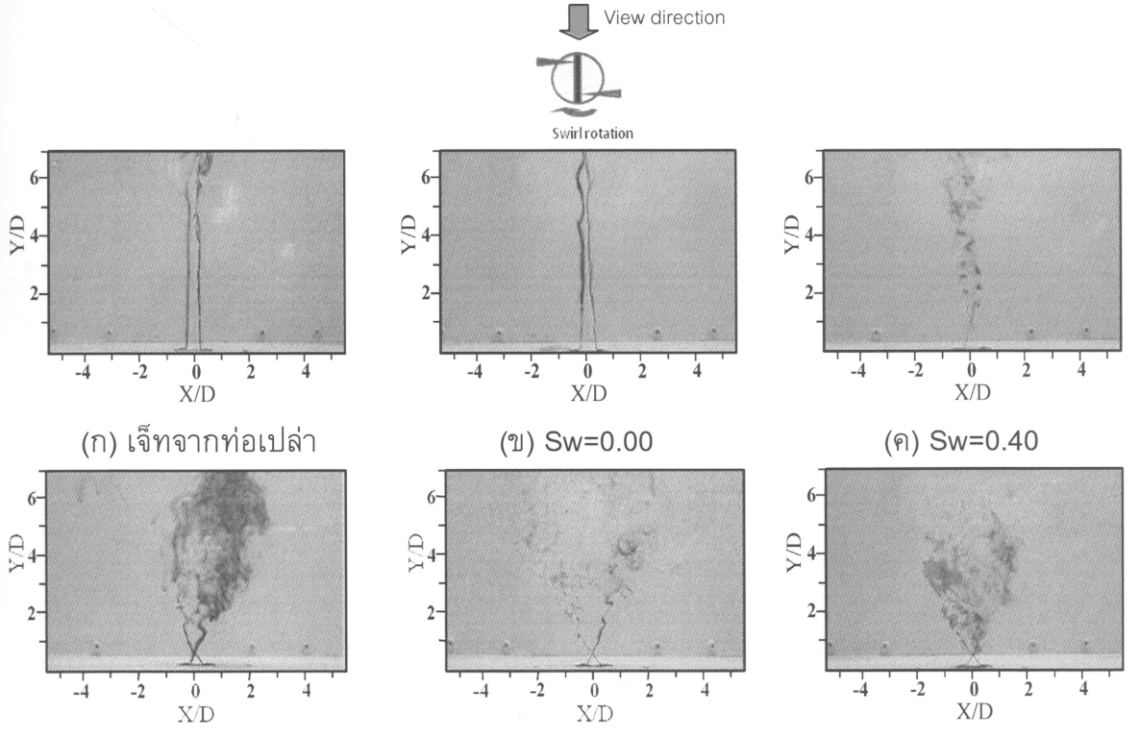
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการแพร่กระจายของเจ็ทอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ จากรูปพบว่าเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 ที่บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ทในช่วง Y/D= 0 - 2 เจ็ทมีลักษณะการไหลแบ่งเป็นสองลำและในส่วนแกนกลางเจ็ทเกิดบริเวณที่ไม่มีสี ซึ่งเป็นผลมาจากบริเวณใกล้สันของแผ่นบิดไม่มีการไหลของเจ็ทเกิดขึ้น หลังจากนั้นเจ็ทจะเริ่มกระจายตัวออกในแนวรัศมี ในกรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 การกระจายของเจ็ทออกตามแนวรัศมีเริ่มเกิดขึ้นที่ตำแหน่งปากทางออก (Y/D=0) และการขยายตัวของเจ็ทจะเพิ่มขึ้นตามสเวิร์ลนัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองดังกล่าวสามารถดูได้เพียงลักษณะการแพร่กระจายของเจ็ทเท่านั้น ไม่สามารถเห็นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในเจ็ทได้



(ก) เจ็ทจากท่อเปล่า (ข) Sw=0.00 (ค) Sw=0.40

(ง) Sw=0.62 (จ) Sw=0.78 (ฉ) Sw=0.94

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการแพร่กระจายของเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ (Re=760)



(ก) เจ็ทจากท่อเปล่า (ข) Sw=0.00 (ค) Sw=0.40

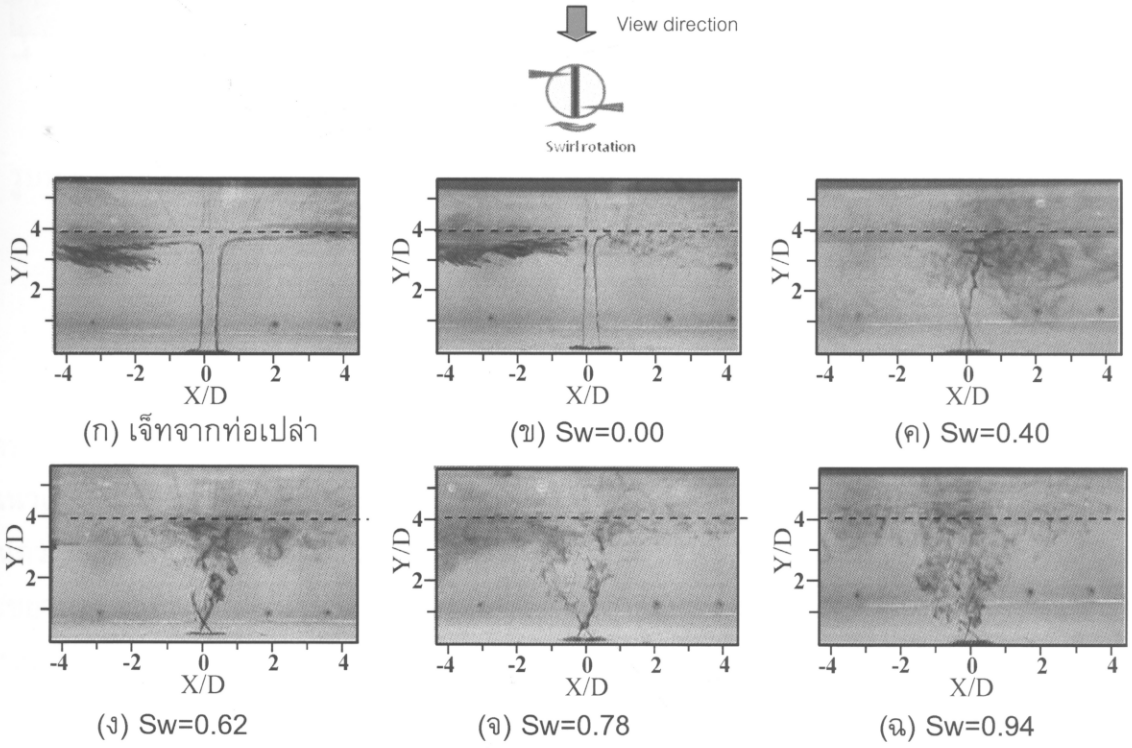
(ง) Sw=0.62 (จ) Sw=0.78 (ฉ) Sw=0.94

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ (Re=760)

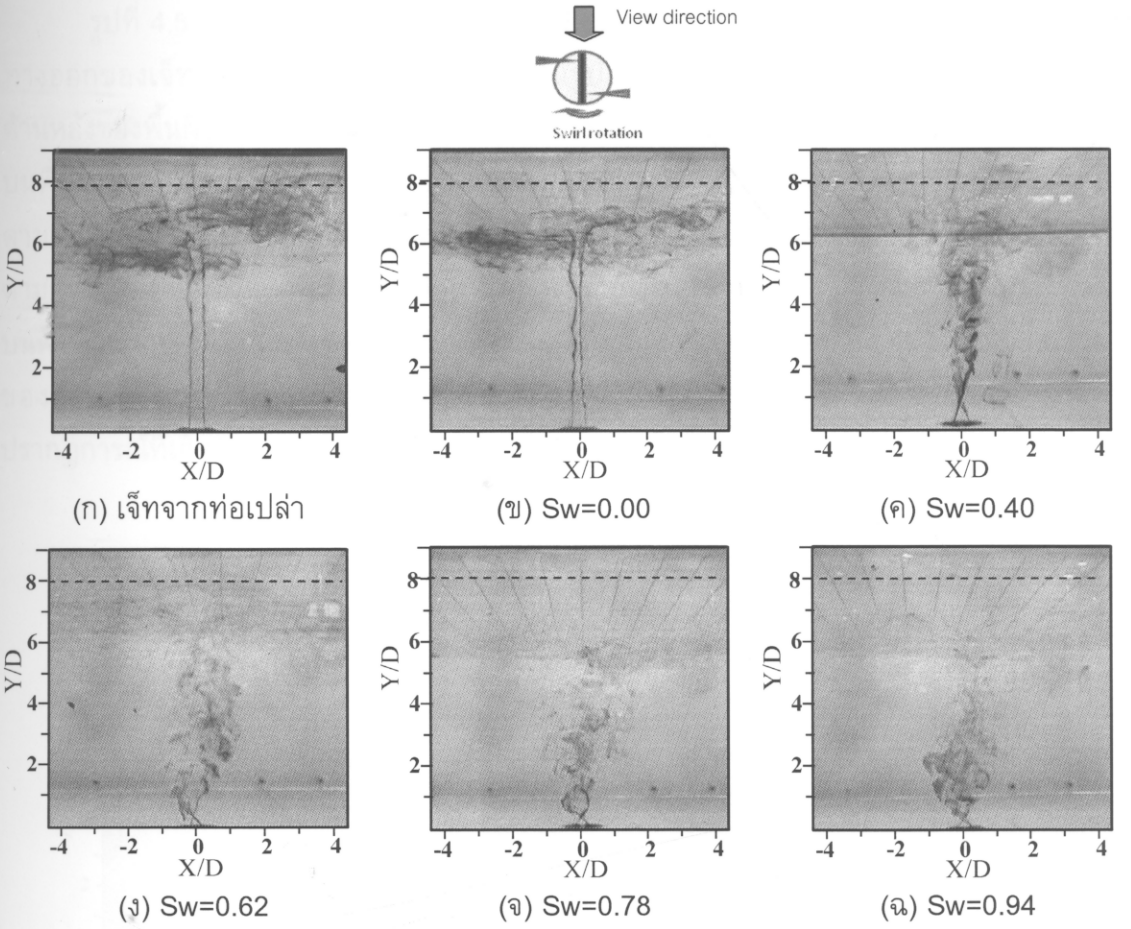
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างการไหลภายในเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ในแต่ละรูปได้วางเข็มฉีดสีในตำแหน่ง C ที่ปากทางออกเจ็ท ในรูปเส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านขวามือของสันแผ่นบิดจะมีสีชมพูแดงและเส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านซ้ายมือจะมีสีน้ำเงิน จากผลการทดลองพบว่า เส้นทางการไหลของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 การไหลของเจ็ทอยู่ในแนวแกนเท่านั้น ในขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 สเวิร์ลนัมเบอร์มีผลต่อมุมของเส้นทางการไหลที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ท เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มขึ้นมุมของเจ็ทที่กระทำกับแนวแกนของเจ็ท (แกน Y) เพิ่มขึ้นตามลำดับ มีผลทำให้การกระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้นและเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่ในบริเวณรอบๆมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.1 และ 4.2 ที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์เดียวกันพบว่า การแพร่กระจายและโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระมีความสอดคล้องกัน

4.1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิว

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D และ 8D ตามลำดับ ในแต่ละรูปได้วางเข็มฉีดสีในตำแหน่ง C โดยที่เส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านขวามือของสันแผ่นบิดจะมีสีชมพูแดงและเส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านซ้ายมือจะมีสีน้ำเงิน



รูปที่ 4.3 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D (Re=760, วางเข็มตำแหน่ง C, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)



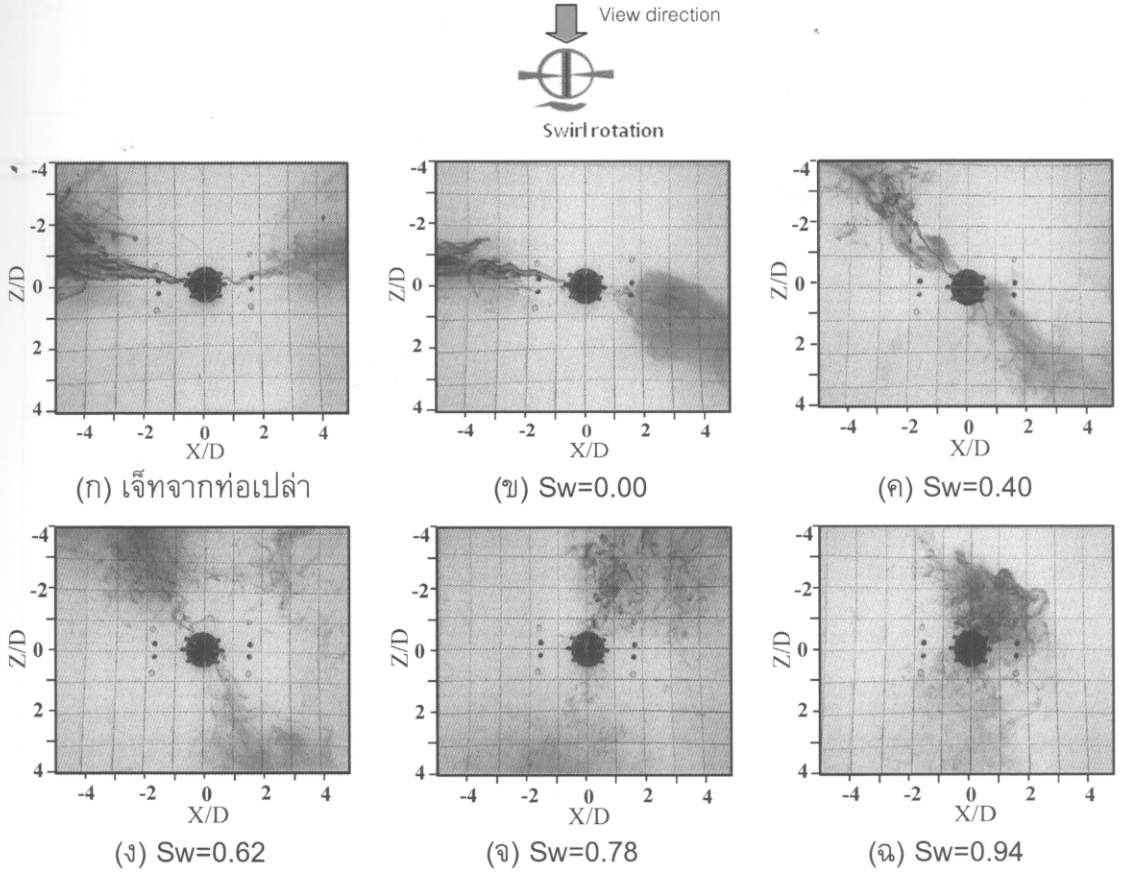
(ก) เจ็ทจากท่อเปล่า (ข) Sw=0.00 (ค) Sw=0.40

(ง) Sw=0.62 (จ) Sw=0.78 (ฉ) Sw=0.94

รูปที่ 4.4 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=8D (Re=760, วางเข็มตำแหน่ง C, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

รูปที่ 4.3 กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D พบว่าเส้นทางการไหลของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 ก่อนที่เจ็ทจะไหลพุ่งชนพื้นผิว การไหลของเจ็ทอยู่ในแนวแกน Y เท่านั้น หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว เจ็ทจะไหลออกบนพื้นผิวตามแนวรัศมี ในขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 ก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว เจ็ทจะเกิดการหมุนควงและขยายตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิวเป็นบริเวณกว้างขึ้น และระยะห่างระหว่างตำแหน่งของเส้นสีแต่ละด้าน (ด้านซ้ายและด้านขวาของแผ่นบิด) ที่พุ่งชนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นตามสเวิร์ลนัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สามารถสังเกตบริเวณที่เกิดการผสมกันระหว่างเส้นสีน้ำเงินและเส้นสีชมพูแดงขึ้น ซึ่งในบริเวณดังกล่าวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว สำหรับกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น L=8D (รูปที่ 4.4) พบว่า เมื่อเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์จะทำให้เจ็ทเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่รอบๆมากขึ้น ส่งผลทำให้การพุ่งชนของเจ็ทบนพื้นผิวลดลงโดยเฉพาะที่เงื่อนไข Sw=0.62, 0.78 และ 0.94

รูปที่ 4.5 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D ในรูปเข็มฉีดสีวางอยู่ในตำแหน่ง B และถ่ายภาพจากด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากผลการทดลองพบว่าสเวิร์ลนัมเบอร์มีผลต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 (รูปที่ 4.5 (ก) และ (ข)) เส้นสีไหลบนพื้นผิวตามแนวแกน X ไปทางด้านซ้ายและขวา แสดงถึงหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว เจ็ทจะไหลแพร่กระจายตามแนวรัศมีบนพื้นผิวเท่านั้น กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 (รูปที่ 4.5 (ค)) การไหลของเส้นสีบนพื้นผิวแยกออกในแนวรัศมีทำมุมกับแนวแกน X ตามเข็มนาฬิกาประมาณ 45° และเมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทเพิ่มมากขึ้น มุมที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวทำมุมกับแนวแกน X เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงสเวิร์ลนัมเบอร์มีผลต่อการไหลของเจ็ท

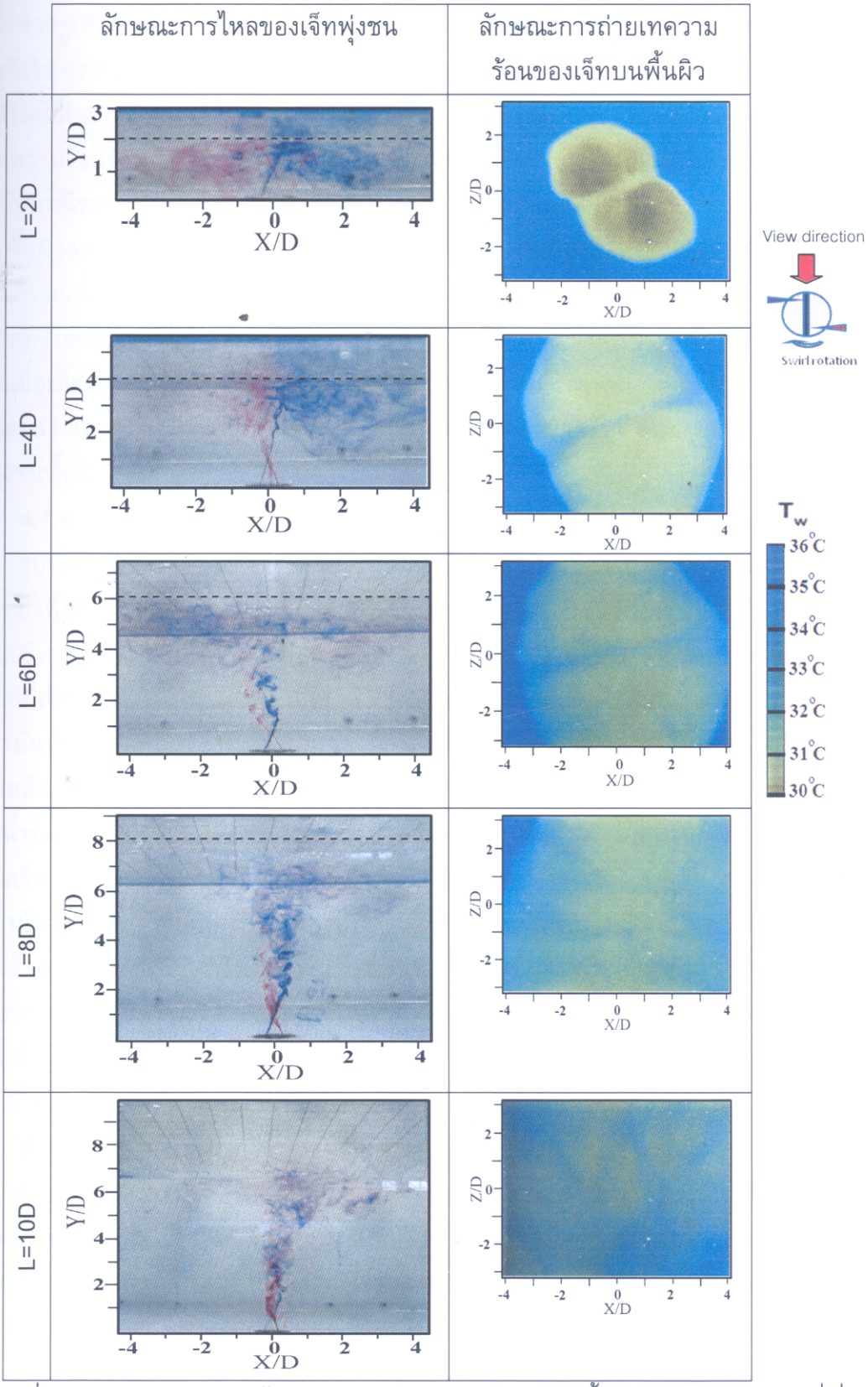


(ก) เจ็ทจากท่อเปล่า (ข) Sw=0.00 (ค) Sw=0.40

(ง) Sw=0.62 (จ) Sw=0.78 (ฉ) Sw=0.94

รูปที่ 4.5 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L= 2D (Re=760, วางเข็มที่ตำแหน่ง B, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

4.1.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ($\dot{q}$ =447 W/m^2, T_j=30°C, Re=760)

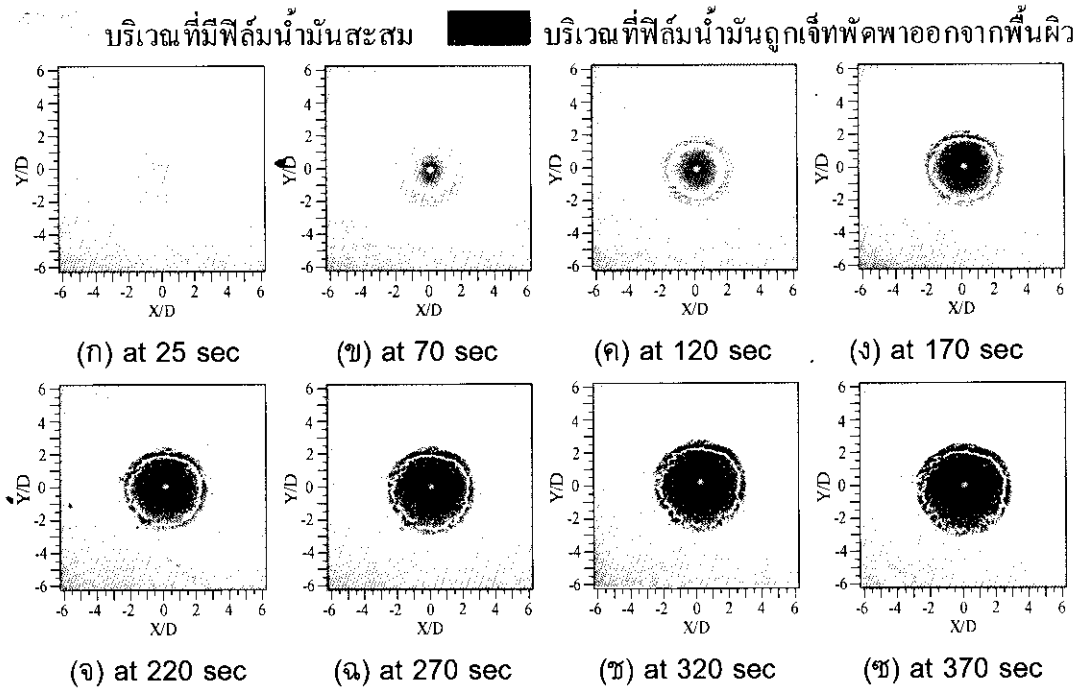
จากรูปที่ 4.6 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงแยกออกเป็นสองบริเวณที่ห่างจากกันเอียงทำมุมกับแกน X กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวขยายเป็นบริเวณกว้างขึ้น แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับกรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D เนื่องจาก โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง เช่นเดียวกับที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=6D และ 8D พบว่าบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวขยายเพิ่มขึ้นแต่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง และที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=10D อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างที่จะต่ำมากเมื่อเทียบกับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ เนื่องจากโมเมนตัมที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างซับซ้อนตามลักษณะการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว

4.1.4 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศลำเดียว

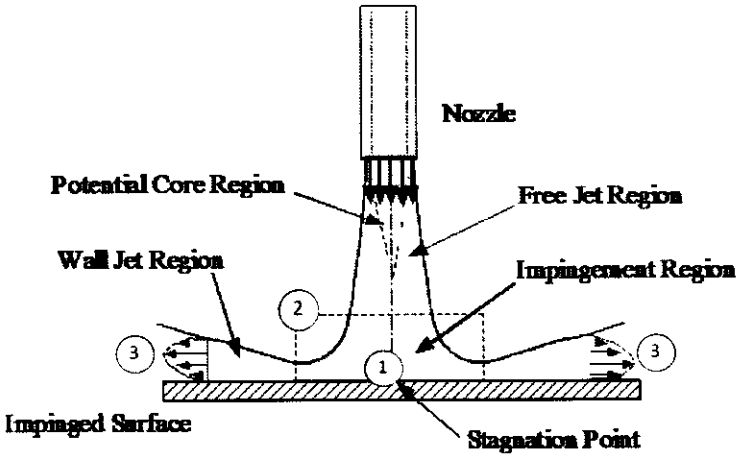
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D บริเวณที่เป็นสีขาวเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสมและบริเวณที่เป็นสีดำเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว จากรูปที่ 4.7 (ก) แสดงที่เงื่อนไขระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผ่านไป 25 s สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นวงกลม ซึ่งจะเห็นจุดสีขาวของน้ำมันที่สะสมอยู่หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มน้ำมันจะไหลออกในแนวรัศมีบนพื้นผิวทำให้สามารถสังเกตบริเวณต่างๆที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวได้ชัดเจน จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) มีฟิล์มน้ำมันเกาะติดอยู่ (บริเวณสีขาวกลางภาพซึ่งเป็นบริเวณที่ ① ของรูปที่ 4.8) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความเร็วของเจ็ทบนพื้นผิวเท่ากับศูนย์ ส่วนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement region) เป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปรอบๆ (บริเวณที่เห็นเป็นผนังสีดำไม่มีน้ำมันเกาะติดซึ่งเป็นบริเวณที่ ② ของรูปที่ 4.8) เนื่องจากการไหลบนพื้นผิวมีความเร่งเกิดขึ้นและมีความเค้นเฉือนบนพื้นผิวที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนพื้นผิว ในบริเวณดังกล่าวฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำซึ่งเป็นบริเวณที่ ③ ของรูปที่ 4.8)

สำหรับรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันกรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 และ 0.62 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าบนพื้นผิวปรากฏเป็นรอยฟิล์มน้ำมันเกิดขึ้น 2 บริเวณอยู่ห่างจากกัน เมื่อระยะเวลาผ่านไปฟิล์มน้ำมันจะถูกเจ็ทพัดพาออกไปในแนวรัศมีจากจุดพุ่งชน (X/D=0, Y/D=0) สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (บริเวณสีดำที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกจากพื้นผิว) และเมื่อระยะเวลาผ่านไปอีกสามารถสังเกตบริเวณของเจ็ทผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปบางส่วน (บริเวณสีขาวสลับสีดำ) นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มน้ำมันสะสมเป็นเส้นสีขาวบางๆตัดผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งเกิดจากผลกระทบของสันแผ่นบิด และเมื่อระยะเวลาผ่านไปตำแหน่งของฟิล์มน้ำมันที่เป็นเส้นสีขาวบางๆยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิมซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวแสดงถึง

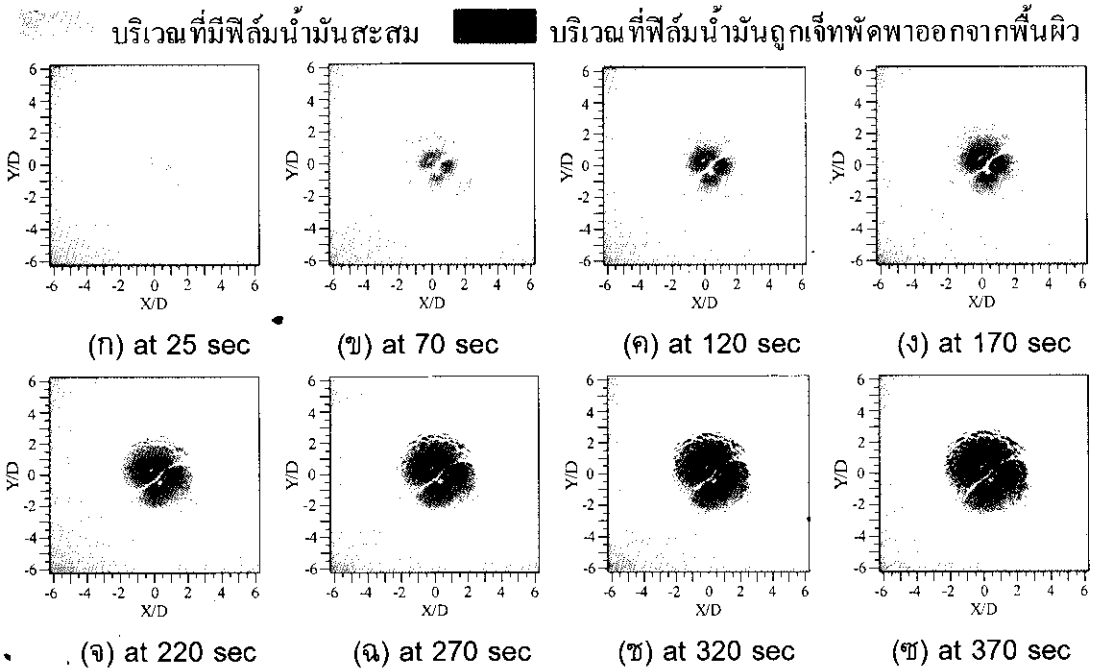
การไหลของเจ็ทหมุนควงหลังจากที่ชนพื้นผิว เจ็ทไหลออกตามแนวรัศมีทันที ไม่ได้เกิดการหมุนควงบนพื้นผิว ซึ่งประเด็นดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5



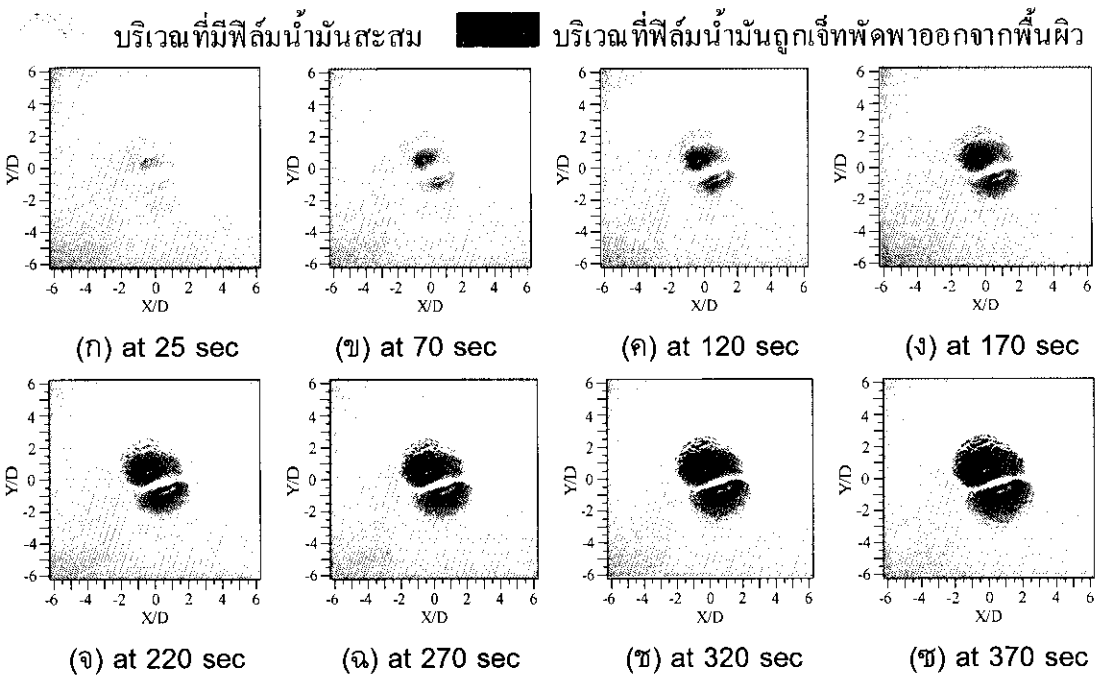
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ L=2D (Re=20,000)



รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างการไหลบนพื้นผิวหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า



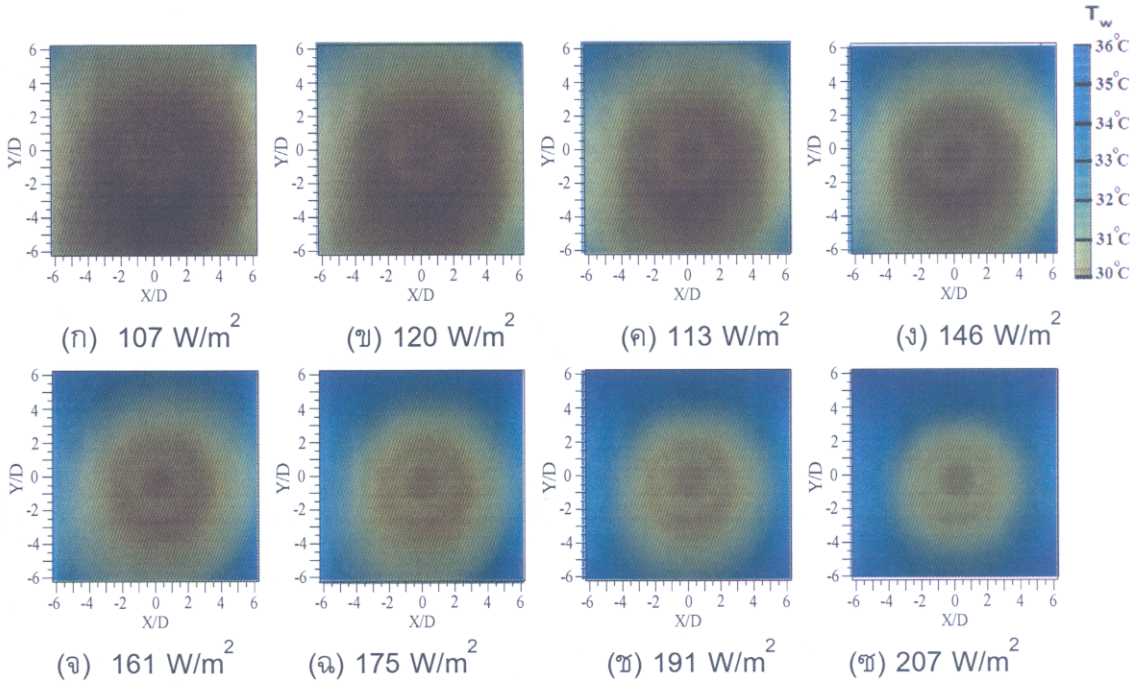
รูปที่ 4.9 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ที่ระยะ L=2D (Re=20,000)



รูปที่ 4.10 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.62 ที่ระยะ L=2D (Re=20,000)

รูปที่ 4.11- 4.13 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่เปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำเดียวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D ในแต่ละรูปแสดงผลกรณีที่เปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เพื่อให้เห็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว กรณีที่ฟลักซ์ความต่ำแสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ และที่ฟลักซ์ความร้อนสูงแสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง

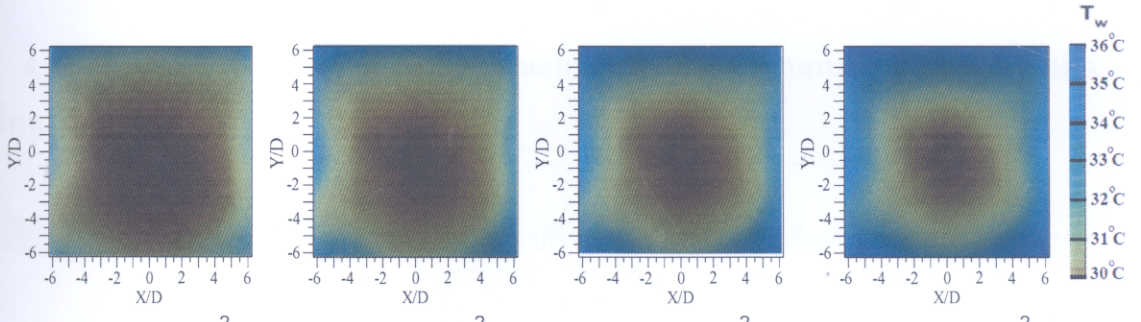
รูปที่ 4.11 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า สามารถสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้ชัดขึ้น จะเห็นปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak heat transfer) ที่เกิดขึ้นเป็นวงแหวนรอบจุดที่เจ็ทพุ่งชนดังแสดงในรูป 4.11 (จ) ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันรูปที่ 4.7 (ค) ที่บริเวณฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกเป็นลักษณะวงแหวนรอบๆบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับกรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 และ 0.62 (รูปที่ 4.12 และ 4.13) เมื่อฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวสูง สามารถสังเกตผลกระทบจากสันของแผ่นบิดที่ทำให้เกิดบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำเป็นแนวยาวตัดผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแยกเป็นสองส่วน ซึ่งที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำไม่สามารถสังเกตผลกระทบจากสันของแผ่นบิดได้ แต่สามารถสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอบๆจุดที่เจ็ทพุ่งชนได้ สำหรับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแยกเป็นสองส่วนเกิดจากลักษณะการไหลของเจ็ทที่ออกจากปากทางออกของหัวฉีดแล้วชนพื้นผิวทันที ซึ่งผลการทดลองที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำที่ได้อธิบายมาแล้ว



(ก) 107 W/m^2 (ข) 120 W/m^2 (ค) 113 W/m^2 (ง) 146 W/m^2

(จ) 161 W/m^2 (ฉ) 175 W/m^2 (ช) 191 W/m^2 (ซ) 207 W/m^2

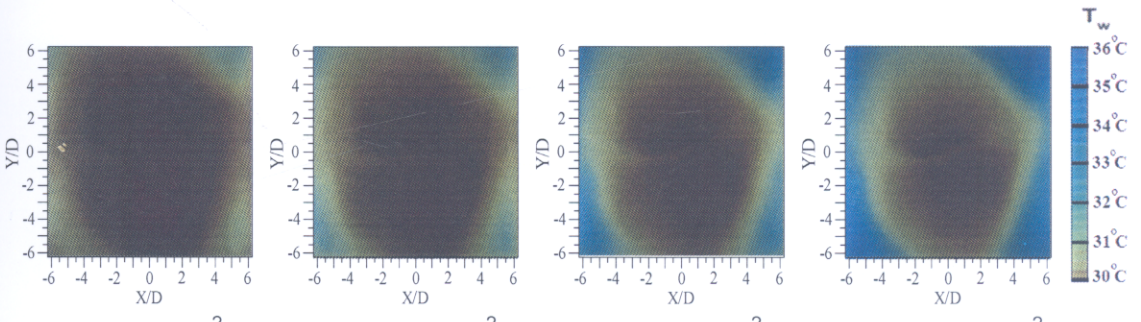
รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ L=2D (T_j=28.5°C, Re=20,000)



(ก) 120 W/m^2 (ข) 113 W/m^2 (ค) 146 W/m^2 (ง) 161 W/m^2

(จ) 175 W/m^2 (ฉ)191 W/m^2 (ช) 207 W/m^2 (ซ) 224 W/m^2

รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีเจ็ทหมุนควง ที่เงื่อนไข Sw=0.40 ที่ระยะ L=2D (T_j=28.5°C, Re=20,000)

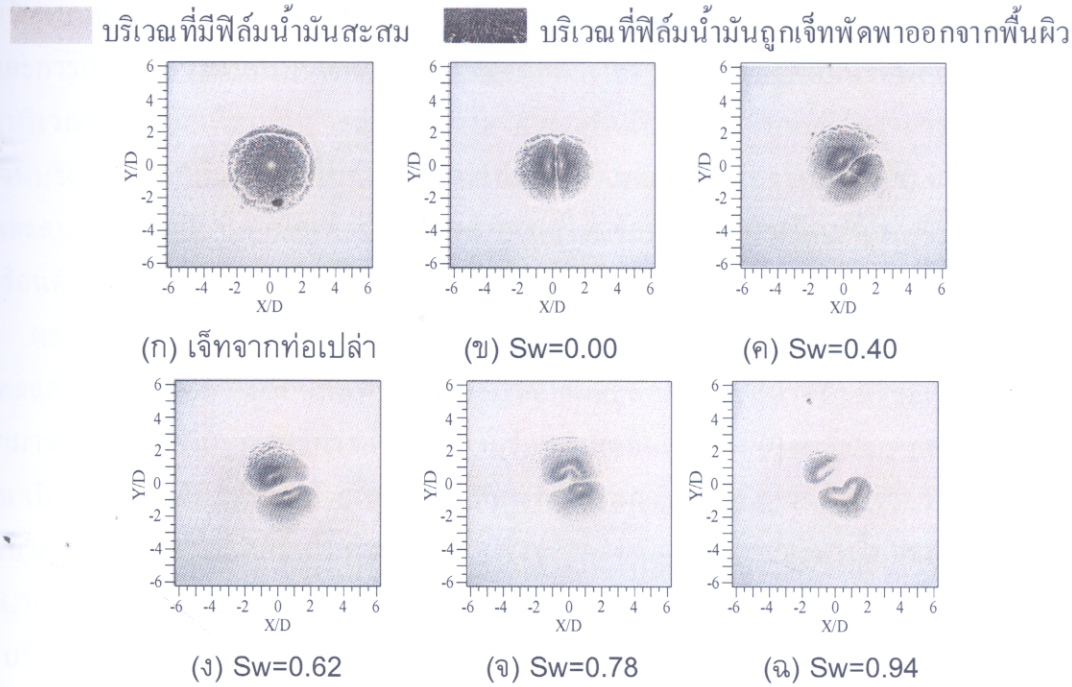


(ก) 96 W/m^2 (ข) 107 W/m^2 (ค) 120 W/m^2 (ง) 133 W/m^2

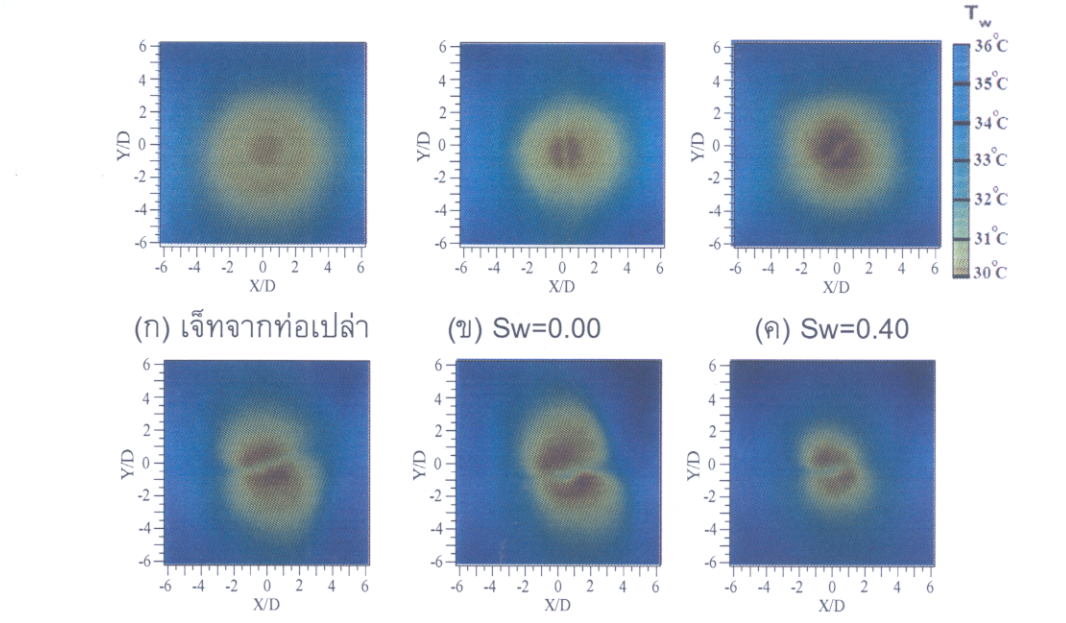
(จ) 146 W/m^2 (ฉ) 161 W/m^2 (ช) 175 W/m^2 (ซ) 191 W/m^2

รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีเจ็ทหมุนควง ที่เงื่อนไข Sw=0.62 ที่ระยะ L=2D (T_j=28.5°C, Re=20,000)

4.1.5 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ



รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่สเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ที่ระยะ L=2D ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec (Re=20,000)



รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ที่ระยะ L=2D (Re=20,000, T_j=28.5°C, $\dot{q}$ =207 W/m^2)

รูปที่ 4.14 แสดงผลการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมันที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และรูปที่ 4.15 แสดงผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่มีค่าเท่ากับ 207 W/m^2 โดยภาพรวมจากการเปรียบเทียบลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.14 และ 4.15 ที่เงื่อนไขเดียวกัน) พบว่าลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีความสอดคล้องกัน บริเวณของฟิล์มน้ำมันที่ถูกเจ็ทพัดพาออกมาก (บริเวณสีดำ) เมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ส่วนบริเวณของฟิล์มน้ำมันที่ถูกเจ็ทพัดพาน้อย (บริเวณที่เป็นสีขาวสลับสีดำ) และบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม (บริเวณสีขาว) เมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำและต่ำมาก

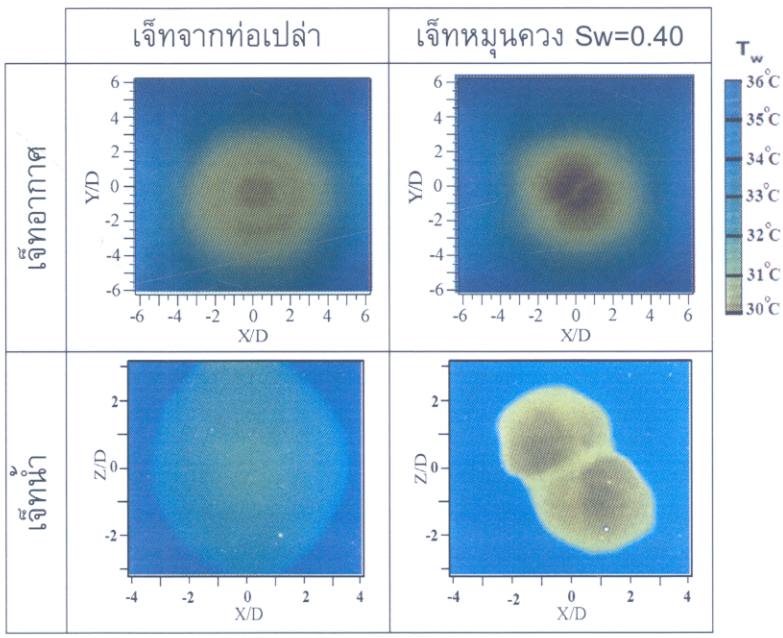
ผลการทดลองในกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า (เปรียบเทียบรูปที่ 4.14 (ก) และ 4.15 (ก)) ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นรูปวงกลมสอดคล้องกับหน้าตัดของท่อเจ็ท จากรูปที่ 4.15 (ก) สามารถสังเกตปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak heat transfer) เกิดขึ้น เป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่มีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหัวข้อต่อไป) ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวในรูปที่ 4.14 (ก) สามารถสังเกตบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสมเป็นวงแหวนล้อมรอบบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน อย่างไรก็ตามบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสมเป็นวงแหวนจะเลื่อนตำแหน่งตามแนวรัศมี ขึ้นอยู่กับระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน (สังเกตจากรูปที่ 4.8)

ผลการทดลองในกรณีของท่อเจ็ทที่สอดแผ่นบิดทำให้เกิดผลกระทบจากสันของแผ่นบิดส่งผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแยกเป็นสองบริเวณ สำหรับผลการทดลองลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว ปรากฏบริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ระหว่างสองบริเวณที่ฟิล์มนั้นถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว (บริเวณที่เป็นเส้นสีขาวตัดผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว จะปรากฏบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (บริเวณที่เป็นเส้นสีเขียวตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน) ในกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 บริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ระหว่างสองบริเวณที่ฟิล์มนั้นถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว (รูปที่ 4.14 (ข)) และบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (รูปที่ 4.15 (ข)) ลักษณะที่เกิดขึ้นสอดคล้องกัน คือตำแหน่งที่เกิดขึ้นตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและอยู่ในลักษณะขนานกับแนวแกน Y ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการวางตำแหน่งของการติดตั้งสันแผ่นบิด แต่ในกรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 พบว่าบริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ระหว่างสองบริเวณที่ฟิล์มนั้นถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว (รูปที่ 4.14 (ค)) และบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำอยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (รูปที่ 4.15 (ค)) ตำแหน่งที่เกิดขึ้นตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและอยู่ในลักษณะเอียงทำมุมกับแนวสันของแผ่นบิดประมาณ 45° และยังพบว่ามุมที่กระทำกับแนวสันของแผ่นบิดเพิ่มมากขึ้นเมื่อสเวิลนัมเบอร์มากขึ้น จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน

ของเจ็ทบนพื้นผิวสอดคล้องกัน เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มขึ้นทำให้มุมที่เจ็ทไหลออกบริเวณปากทางออกของท่อเจ็ทกระทำกับแนวสันของแผ่นบิดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อตำแหน่งที่เจ็ทแต่ละด้านของแผ่นบิดพุ่งชนพื้นผิวเอียงทำมุมกับแนวสันของแผ่นบิดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำที่แสดงในรูปที่ 4.5

4.1.6 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่เป็นเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำ

รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีของเจ็ทอากาศที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่มีค่าเท่ากับ 207 W/m^2, T_j=28.5°C, Re=20,000 และกรณีของเจ็ทน้ำที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่มีค่าเท่ากับ 447 W/m^2, T_j=30°C, Re=760 สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และฟลักซ์ความร้อนคงที่บนพื้นผิวของเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำมีความแตกต่างกัน แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีความสอดคล้องกัน



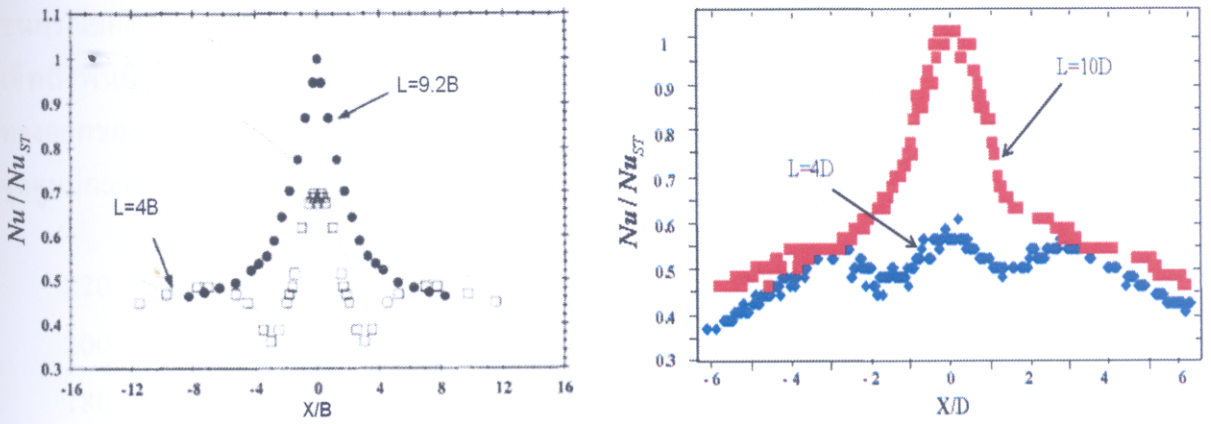
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ ($\dot{q}$ = 207 W/m^2, T_j=28.5°C, Re=20,000) และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ ($\dot{q}$ =447 W/m^2, T_j=30°C, Re=760) ที่ระยะ L=2D

ในกรณีเจ็ทจากท่อเปล่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำมีลักษณะเป็นรูปวงกลม และบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แต่สำหรับการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำจะไม่เกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสองเนื่องจากเป็นการไหลในช่วงที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ [20, 21] ในกรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำแยกเป็นสองบริเวณ บริเวณ

ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (บริเวณที่เป็นเส้นสีเขียวตัดผ่านศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน) ที่เกิดจากผลของสันแผ่นบิด พบว่ากรณีของเจ็ทน้ำและเจ็ทอากาศเกิดขึ้นในลักษณะเอียงทำมุมกับแนวสันแผ่นบิดในแนวเดียวกัน

4.2 การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศลำเดียวพุ่งชน

สำหรับหัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายเกี่ยวกับอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศในกรณีของเจ็ทลำเดียว ในส่วนแรกจะเปรียบเทียบผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจากงานวิจัยครั้งนี้เทียบกับผลการศึกษาที่ได้จากการทบทวนเอกสารงานวิจัย จากนั้นจะอธิบายถึงผลกระทบของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า และสุดท้ายจะอธิบายผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D และ 10D



(ก) ผลการทดลองของ Ashforth-Frost และคณะ [6] (ข) ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้

(B คือความกว้างของสล็อต)

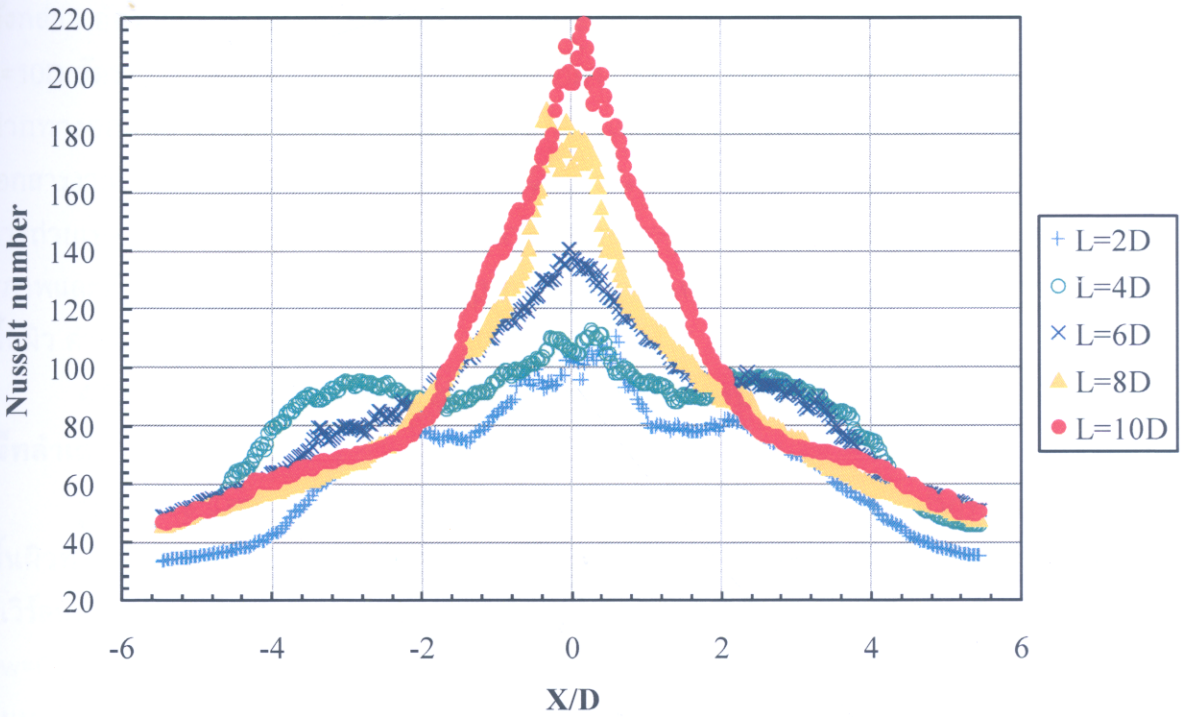
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์จากผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยและผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ (Re=20,000 เท่ากันทั้งสองกรณี)

รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า รูปที่ 4.17 (ก) เป็นผลการทดลองของ Ashforth-Frost และคณะ [6] โดยใช้หัวฉีดที่เป็นแบบสล็อต ในที่นี้ B คือความกว้างของสล็อต สำหรับรูปที่ 4.17 (ข) เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ โดยผลการทดลดลองที่แสดงในรูปที่ 4.17 (ข) ได้จากการวิเคราะห์ระบบสีแบบ RGB ซึ่งจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยจากผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบสีแบบ HUE โดยจะกล่าวรายละเอียดของการวิเคราะห์ภาพสีแบบ RGB ในภาคผนวกที่ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองกรณี พบว่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวมีลักษณะคล้ายกัน คือกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึง

พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ (รูปที่ 4.17 (ก) ที่เงื่อนไขระยะ L=4B และ รูปที่ 4.17 (ข) ที่เงื่อนไขระยะ L=4D) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทั้งสองกรณีเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak heat transfer) แต่ตำแหน่งที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีแตกต่างกัน อาจจะเป็นสาเหตุมาจากลักษณะหัวฉีดที่เป็นแบบสล็อตและแบบท่อกลม ซึ่งลักษณะการไหลที่ปากทางออกของท่อเจ็ทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สำหรับในกรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง (รูปที่ 4.17 (ก) ที่เงื่อนไขระยะ L=9.2B และรูปที่ 4.17 (ข) ที่เงื่อนไขระยะ L=10D) กรณีดังกล่าวระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่นัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวมีลักษณะเหมือนกัน คือนัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและจะค่อยๆลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ท

4.2.1 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า

รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า สำหรับเส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงผลของตัวแปรระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ โดยภาพรวมของผลการทดลองในทุกๆกรณีตัวแปรระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนแล้วค่อยๆลดลงตามแนวรัศมี



รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า (Re=20,000)

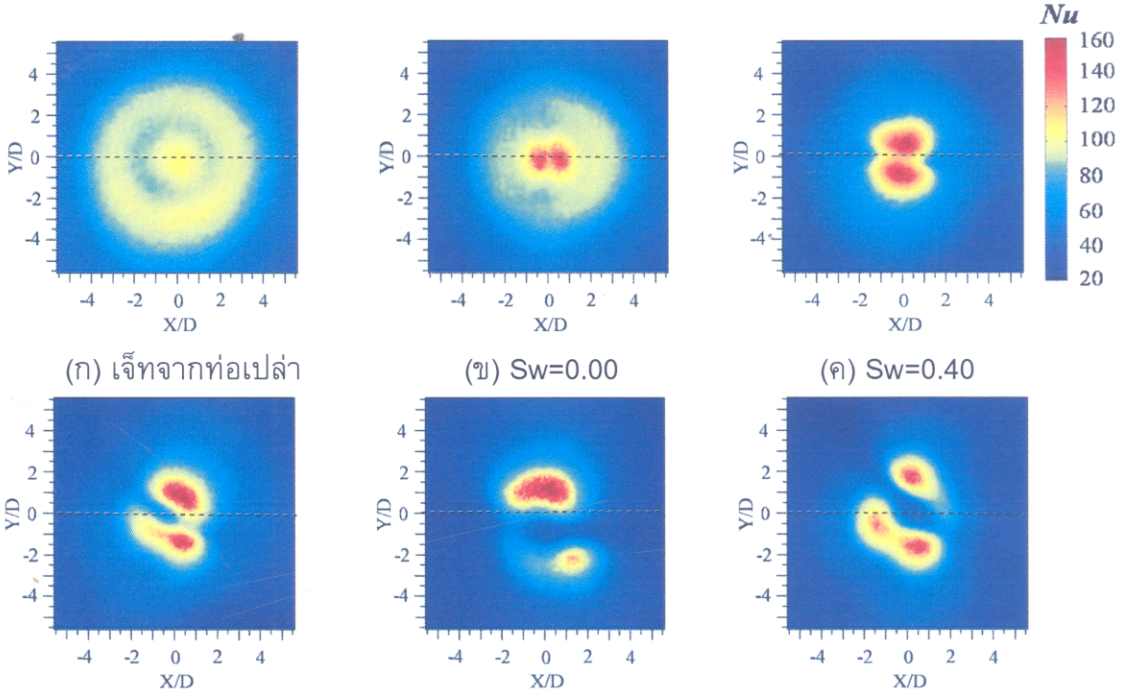
กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างต่ำกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ เนื่องจากเป็นระยะที่เจ็ทไหลออกจากท่อพุ่งชนพื้นผิวทันที และเป็นช่วงการไหลของเจ็ทที่มีการขยายหน้าตัดได้น้อย สอดคล้องกับผลการทดลองการแพร่กระจายของเจ็ทอิสระรูปที่ 4.1 สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (X/D=0) และค่อยๆลดลงตามแนวแกน X จากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งที่พิกัด X/D=±2 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak heat transfer) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ashforth-Frost และ คณะ [6] ซึ่งได้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการไหลบนพื้นผิวโดยที่บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเป็นการไหลแบบราบเรียบ หลังจากที่เจ็ทไหลตามพื้นผิวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลเป็นแบบปั่นป่วนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ระยะ L=2D แต่ก็ยังคงเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง โดยเลื่อนตำแหน่งที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงพิกัด X/D=±3 ห่างออกจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (X/D=0) มากขึ้นเมื่อเทียบกับที่ระยะ L=2D ส่วนกรณีที่ระยะ L=6D อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีที่ระยะ L=4D และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอมากสุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ ส่วนกรณีที่ระยะ L=8D และ 10D อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเฉพาะบริเวณพิกัดที่อยู่ในช่วงระหว่าง X/D=-1.5 ถึง X/D=1.5 นอกจากช่วงพิกัดดังกล่าว อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างต่อเนื่องและต่ำกว่าที่ระยะ L=6D นอกจากนี้ที่ระยะ L=10D อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงสุดเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนเอกสารงานวิจัย ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง L=6D-8D จะเกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทเจ็ทพุ่งชน สำหรับสาเหตุที่มีความแตกต่างมาจากสภาพและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เช่น รูปทรงหัวฉีด การจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิว ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เป็นต้น [16, 20, 21]

4.2.2 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียว

รูปที่ 4.19 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D จากรูปสามารถเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของแต่ละกรณีสเวิร์ลนัมเบอร์ เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชน พบว่ากรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 และ 0.40 (รูปที่ 19 (ข) และ (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนเหมือนกับอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทจากท่อเปล่า เมื่อเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์มากขึ้น (Sw=0.62, 0.78 และ 0.94) พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทจากท่อ

เปล่า ในกรณีที่พิจารณาบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของเจ็ทจากท่อเปล่าเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ส่วนเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะแยกออกเป็นสองบริเวณและเกิดขึ้นใกล้กับจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และระยะห่างระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดทั้งสองบริเวณเพิ่มมากขึ้นเมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองจะสอดคล้องกับกรณีที่ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำในรูปที่ 4.3

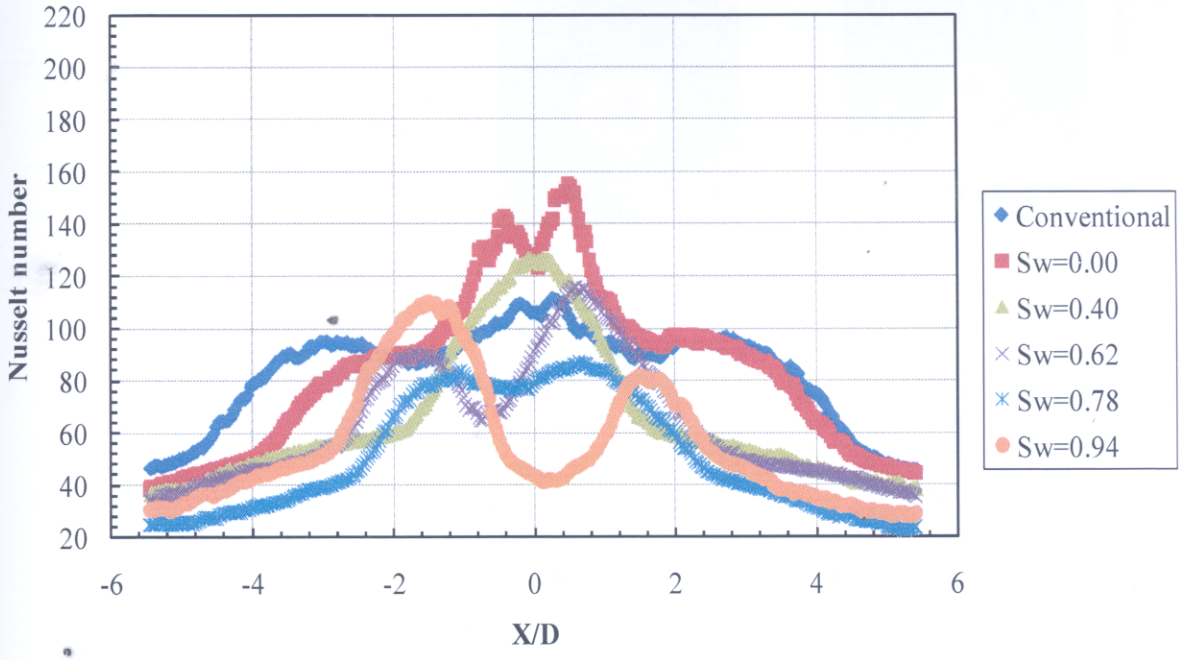


(ก) เจ็ทจากท่อเปล่า (ข) Sw=0.00 (ค) Sw=0.40

(ง) Sw=0.62 (จ) Sw=0.78 (ฉ) Sw=0.94

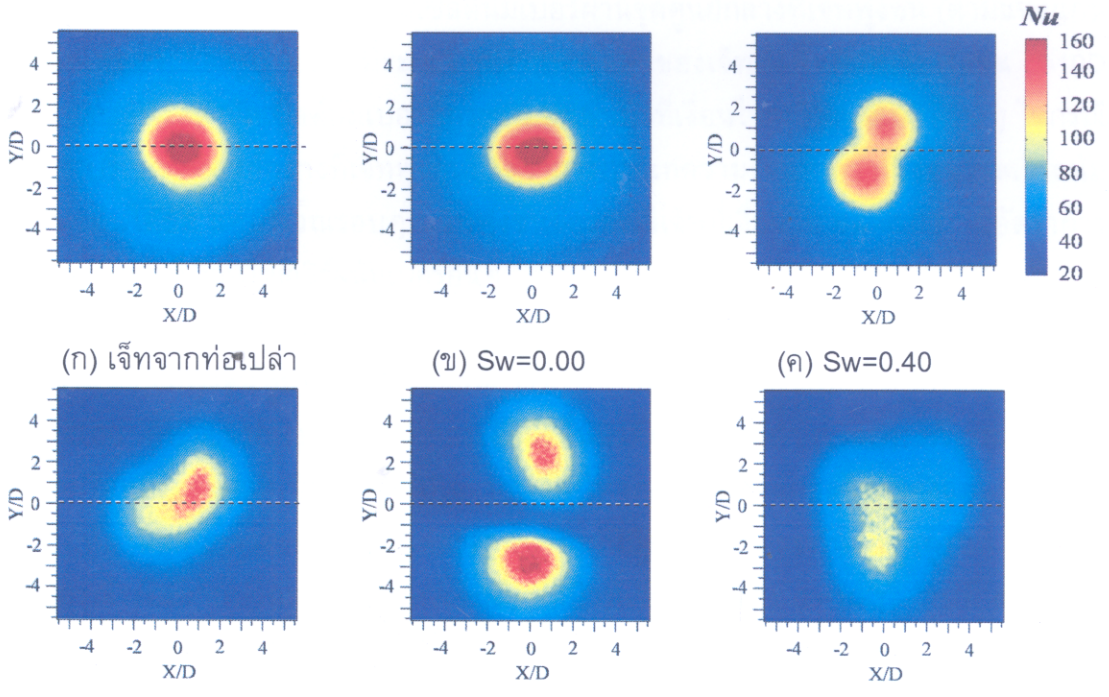
รูปที่ 4.19 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ L=4D (Re=20,000)

รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (ตามแนวแกน Y/D=0 ที่เป็นเส้นประของรูป 4.19) ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D สำหรับกราฟแต่ละเส้นแสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ จากรูปพบว่าเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.00 บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ สำหรับเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 พบว่าบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงอยู่ในช่วงที่แคบ (ระหว่าง X/D=-0.5 ถึง X/D=0.5) เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขเดียวกันรูปที่ 4.19 (ค) พื้นที่ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (บริเวณที่เป็นสีแดง) มีบริเวณกว้างกว่าที่แสดงในรูปที่ 4.20 เนื่องจากตำแหน่งที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบนพื้นผิวของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.40 ไม่ได้เกิดขึ้นที่บริเวณศูนย์กล่างที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะเกิดขึ้นห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งในรูปที่ 4.20 เป็นนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน จึงทำให้เส้นกราฟที่แสดงพื้นที่ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีบริเวณแคบ

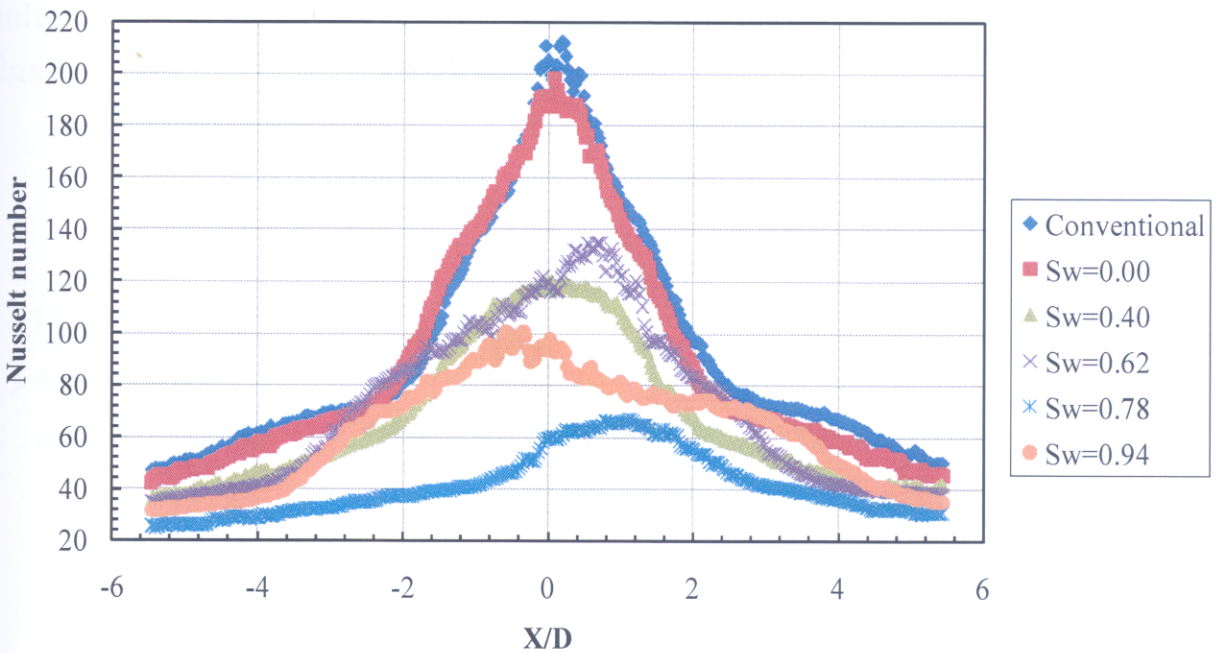


รูปที่ 4.20 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ L=4D (Re=20,000)

รูปที่ 4.21แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=10D จากรูปสามารถเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของแต่ละกรณีที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ ในกรณีที่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 และ 0.40 บริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มมากขึ้น (Sw=0.62, 0.78 และ 0.94) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนต่ำลง กรณีที่พิจารณาบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและมีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.40 (รูปที่ 4.21 (ค)) บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและมีลักษณะเหมือนวงกลมสองวงสัมผัสกัน เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มมากขึ้น (Sw=0.62, 0.78 และ 0.94) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนต่ำลง โดยเฉพาะที่เงื่อนไข Sw=0.94 (รูปที่ 4.21 (ฉ)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำสุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ สาเหตุที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำเกิดจากที่เงื่อนไขดังกล่าว สเวิร์ลนัมเบอร์มีค่ามากทำให้การหมุนควงของเจ็ทเกิดขึ้นสูง ส่งผลต่อความเร็วในแนวแกนของเจ็ทลดลง ประกอบกับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง ทำให้โมเมนตัมที่พุ่งชนพื้นผิวลดลงซึ่งจะสอดคล้องกับกรณีที่ได้มีศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำ (ดูผลการทดลองในรูปที่ 4.6 ประกอบ)



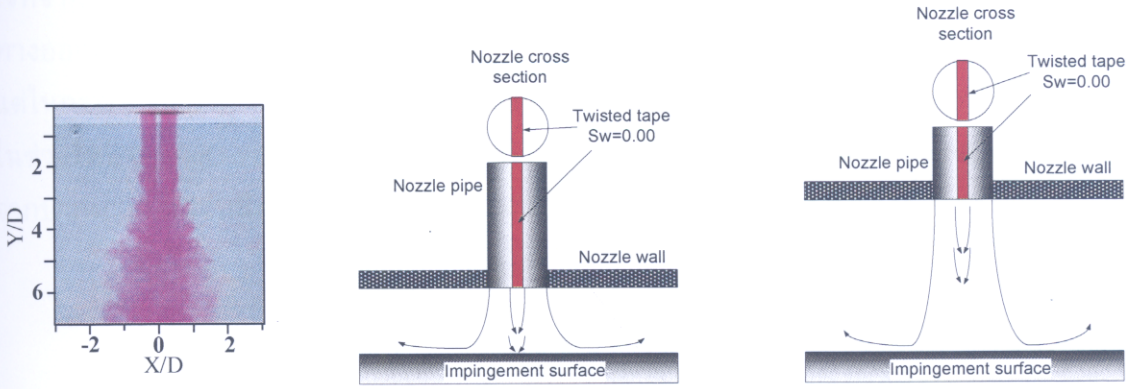
รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ L=10D (Re=20,000)



รูปที่ 4.22 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ L=10D (Re=20,000)

รูปที่ 4.22 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (ตามแนวแกน Y/D=0 ที่เป็นเส้นประของรูป 4.21) ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=10D สำหรับกราฟแต่ละเส้นแสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ในกรณีเจ็ทจากท่อเปล่าบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆอย่างเห็นได้ชัด แต่บริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนของกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ

สำหรับสันของแผ่นบิดมีผลต่อการไหลของเจ็ทที่ปากทางออก ทำให้มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน รูปที่ 4.19 (ข) แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ (L=4D) บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงแยกออกเป็นสองจุด เกิดจากเจ็ทที่ไหลออกจากท่อแต่ละด้านของแผ่นบิดพุ่งชนพื้นผิวทันที ทำให้ส่วนแกนกลางของเจ็ทในแต่ละด้านของแผ่นบิดเกิดการผสมกันน้อย (ดูรูปที่ 4.23 (ข) ประกอบ) แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง (L=10D รูปที่ 4.21 (ข)) บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีแค่เพียงแค่จุดเดียว เกิดจากส่วนแกนกลางของเจ็ทเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ททั้งสองด้านของแผ่นบิดอย่างสมบูรณ์ (ดูรูปที่ 4.23 (ค) ประกอบ) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำอิสระตามที่แสดงในรูปที่ 4.23 (ก) ผลของสันแผ่นบิดทำให้ในส่วนแกนกลางของเจ็ทในช่วง Y/D=0-2 ไม่มีสีเนื่องจากไม่มีการผสมกันระหว่างเจ็ทแต่ละด้านของแผ่นบิด สำหรับในช่วง Y/D=2-3 ในส่วนแกนกลางของเจ็ทเกิดการผสมกันเล็กน้อย และในช่วง Y/D=4 ในส่วนแกนกลางของเจ็ทเกิดการผสมอย่างสมบูรณ์



(ก) เจ็ทน้ำอิสระ (ข) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ L ต่ำ (ค) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ L สูง

รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่เกิดการผสมกันในส่วนแกนกลางของเจ็ทที่เกิดจากผลของสันแผ่นบิดกรณีที่เงื่อนไข Sw=0.00

4.2.3 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียวที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ต่าง ๆ

รูปที่ 4.24 – 4.28 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่อยู่ในช่วงพื้นที่รัศมี 0≤r≤1D-5D ตามลำดับ โดยค่านัสเวิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยหาได้จากสมการ

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k} \tag{4.1}$$

$$\bar{h} = \frac{\dot{q}}{\overline{T_w} - T_j} \tag{4.2}$$

โดยที่ $\bar{h}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิว

D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท

k คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ

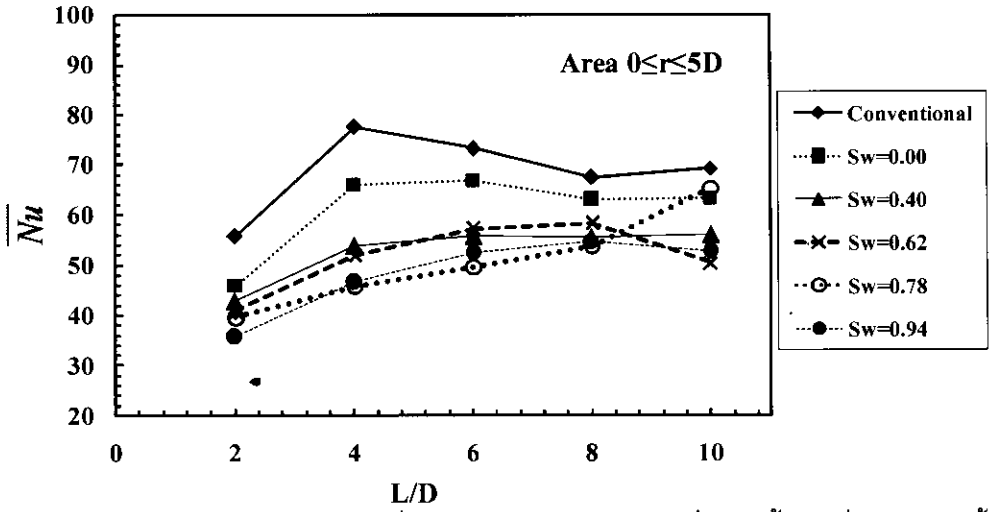
$\dot{q}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว

$\overline{T_w}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว

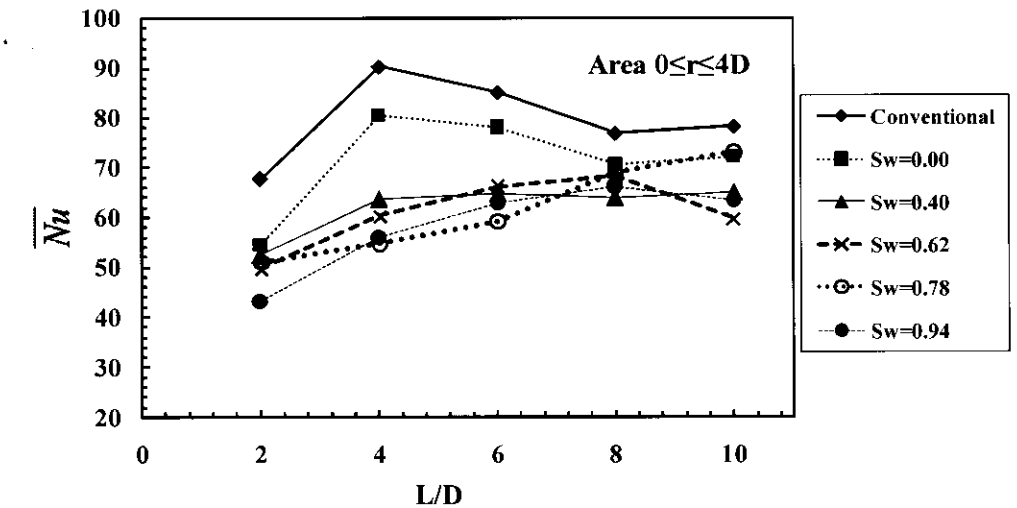
$\overline{T_j}$ คือ อุณหภูมิของเจ็ท

โดย $\overline{T_w}$ เป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ที่พิจารณาบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

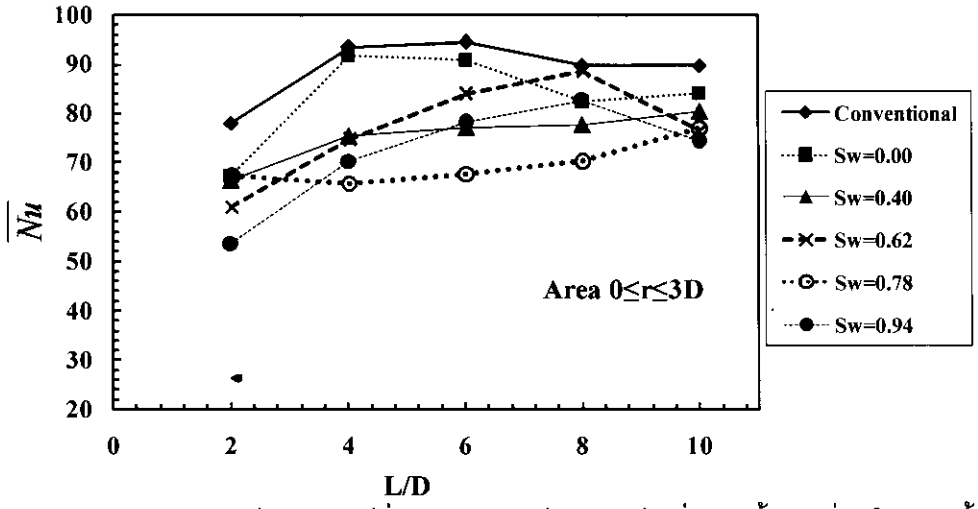
จากรูปที่ 4.24 – 4.26 (ขนาดของพื้นที่ที่พิจารณาอยู่ในช่วงรัศมี 0≤r≤3D-5D) พบว่ากรณีของเจ็ทจากท่อเปล่ามีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีตัวแปรอื่นๆ ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทั้งหมด เนื่องจากพิจารณาในกรณีพื้นที่อยู่ในช่วงรัศมีบนพื้นผิวกว้าง แต่ในกรณีที่พิจารณาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวในช่วงที่แคบ (ขนาดของพื้นที่ที่พิจารณาอยู่ในช่วงรัศมี 0≤r≤1D-2D) ตามที่แสดงในรูปที่ 4.27-4.28 พบว่าเจ็ทหมุนควง Sw=0.40 ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D-4D มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุด



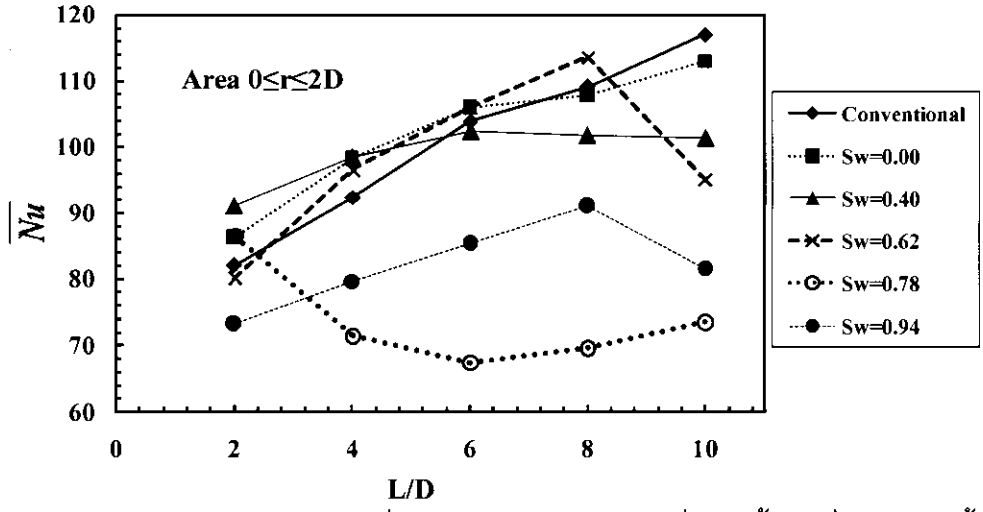
รูปที่ 4.24 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่อยู่ในช่วงพื้นที่รัศมี 0≤r≤5D (Re=20,000)



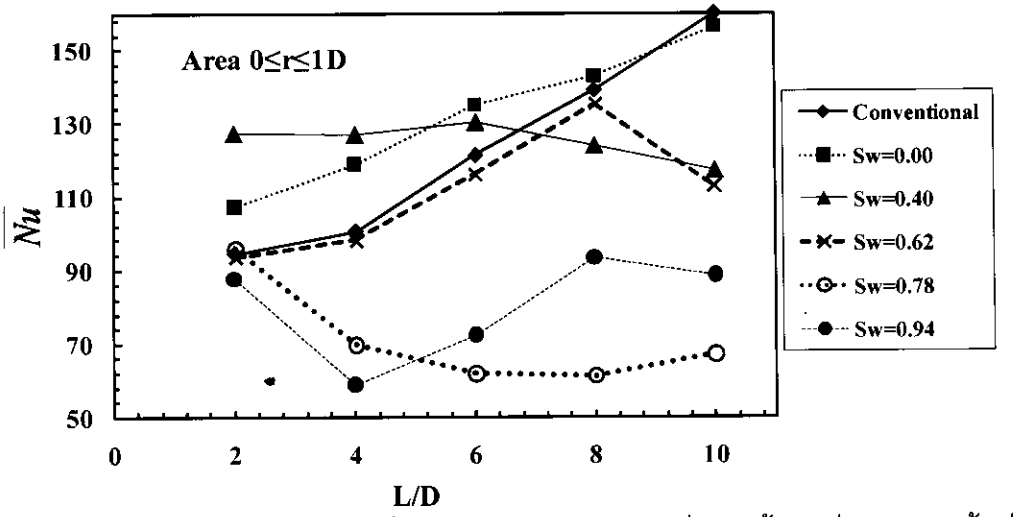
รูปที่ 4.25 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่อยู่ในช่วงพื้นที่รัศมี 0≤r≤4D (Re=20,000)



รูปที่ 4.26 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่อยู่ในช่วงพื้นที่รัศมี 0≤r≤3D (Re=20,000)



รูปที่ 4.27 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่อยู่ในช่วงพื้นที่รัศมี 0≤r≤2D (Re=20,000)

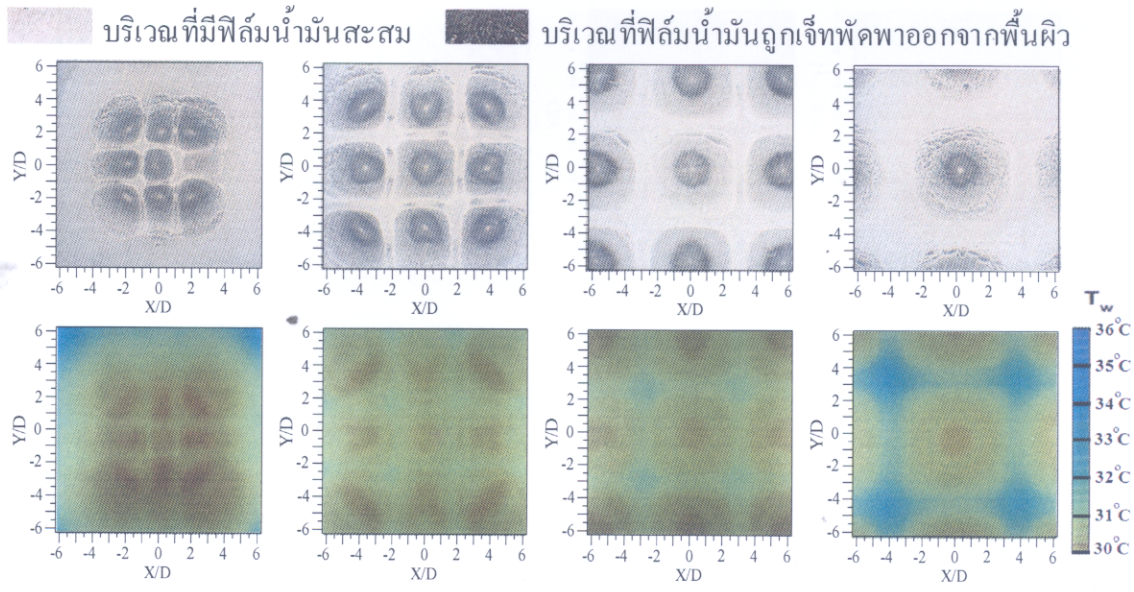


รูปที่ 4.28 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่อยู่ในช่วงพื้นที่รัศมี 0≤r≤1D (Re=20,000)

สำหรับผลการทดลองทั้งหมดของกรณีเจ็ทลำเดียวสามารถสรุปได้ดังนี้ การไหลหมุนควงช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเฉพาะกรณีการไหลหมุนควงที่ระดับต่ำ (Sw=0.40) และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ (L=2D และ 4D) เท่านั้น ส่วนการไหลหมุนควงที่ระดับสูง (Sw=0.62, 0.78 และ 0.94) และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง (L= 8D และ 10D) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า สำหรับกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 บริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทจากท่อเปล่านั้นไม่ได้เกิดจากการไหลหมุนควงของเจ็ท เพราะที่เงื่อนไขดังกล่าวได้สอดแผ่นบิดแบบตรงในท่อเจ็ท แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นเกิดจากความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 สูงกว่าความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ทจากท่อเปล่า เนื่องจากการทดลองทั้งหมดกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทคงที่ พื้นที่หน้าตัดท่อเจ็ท Sw=0.00 น้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดท่อเปล่า ทำให้ความเร็วที่ปากทางออกเพิ่มขึ้น

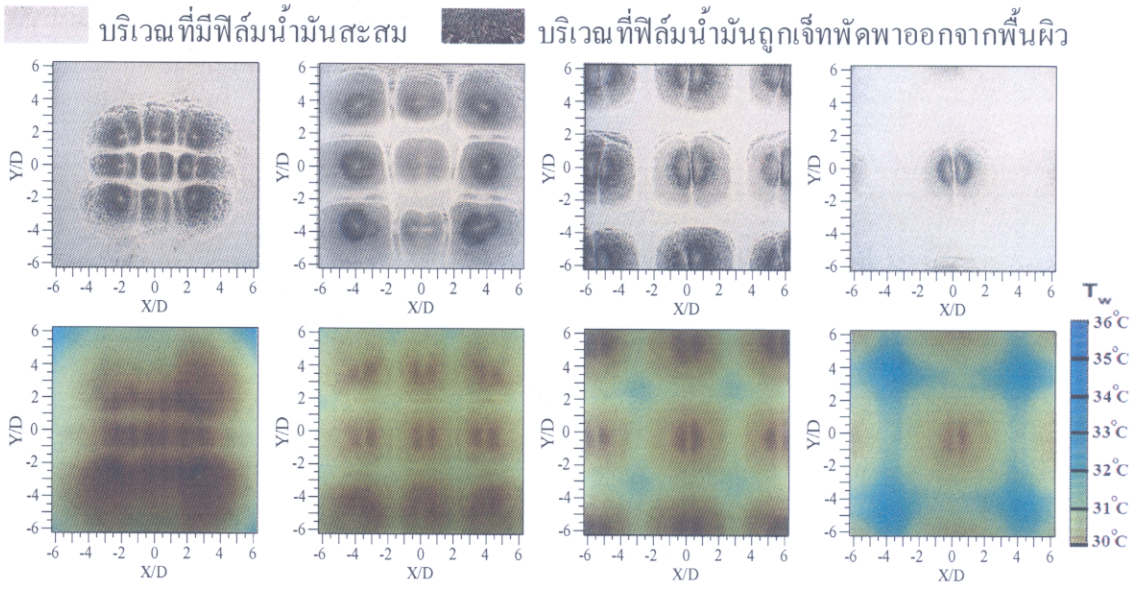
4.3 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 4.29-4.32 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน จากภาพรวมผลการเปรียบเทียบลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีความสอดคล้องกัน คือจากผลการทดลองลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว บริเวณของฟิล์มน้ำมันที่ถูกเจ็ทพัดพาออกมาก (บริเวณสีดำ) เมื่อเทียบกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ส่วนบริเวณของฟิล์มน้ำมันที่ถูกเจ็ทพัดพาน้อยหรือบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ (บริเวณสีขาวหรือบริเวณสีขาวสลับสีดำ) เมื่อเทียบกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำและต่ำมาก (บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงบนพื้นผิว)



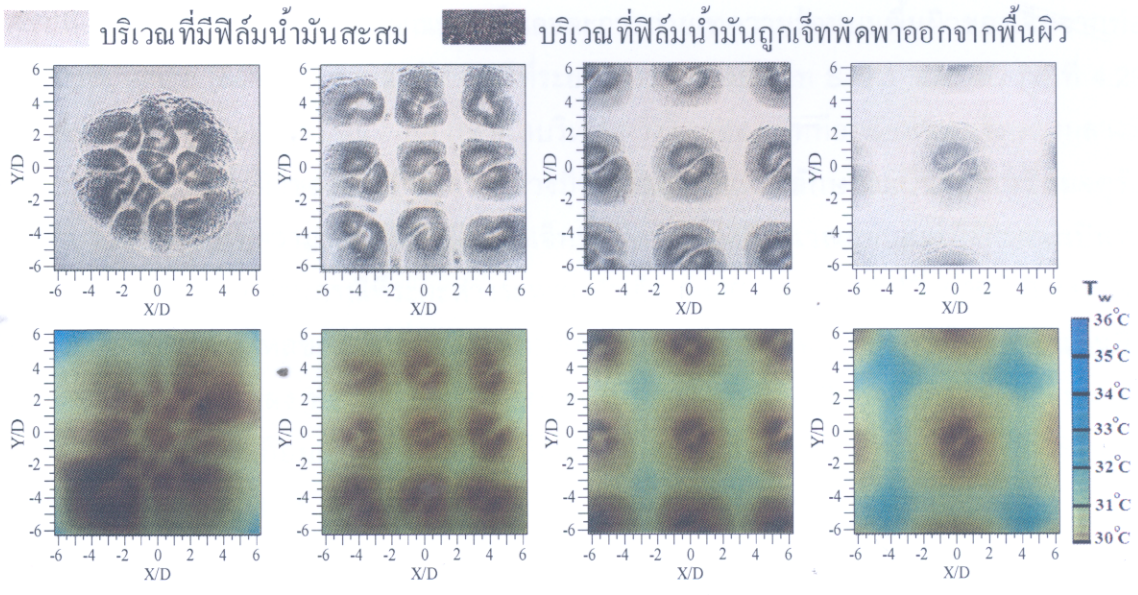
(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.29 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ L=2D, $\dot{q}$ =207 W/m^2 (T_j=28.5°C, Re=20,000)



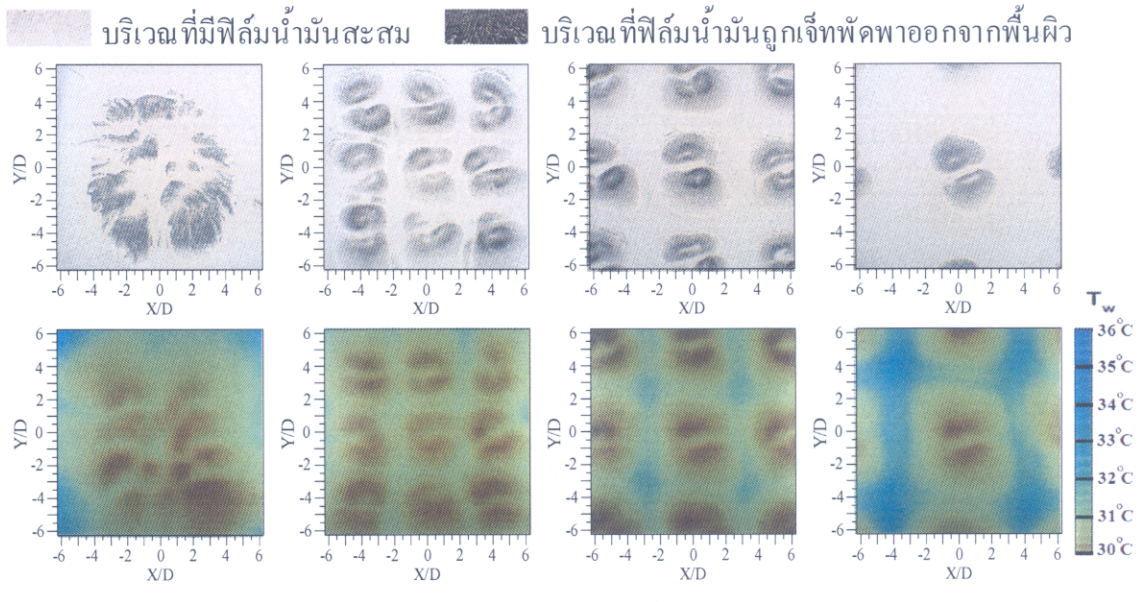
(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข Sw=0.00 ระยะ L=2D, $\dot{q}$ =207 W/m^2 (T_j=28.5°C, Re=20,000)



(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.31 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข Sw=0.40 ระยะ L=2D, $\dot{q}$ =207 W/m^2 (T_j=28.5°C, Re=20,000)

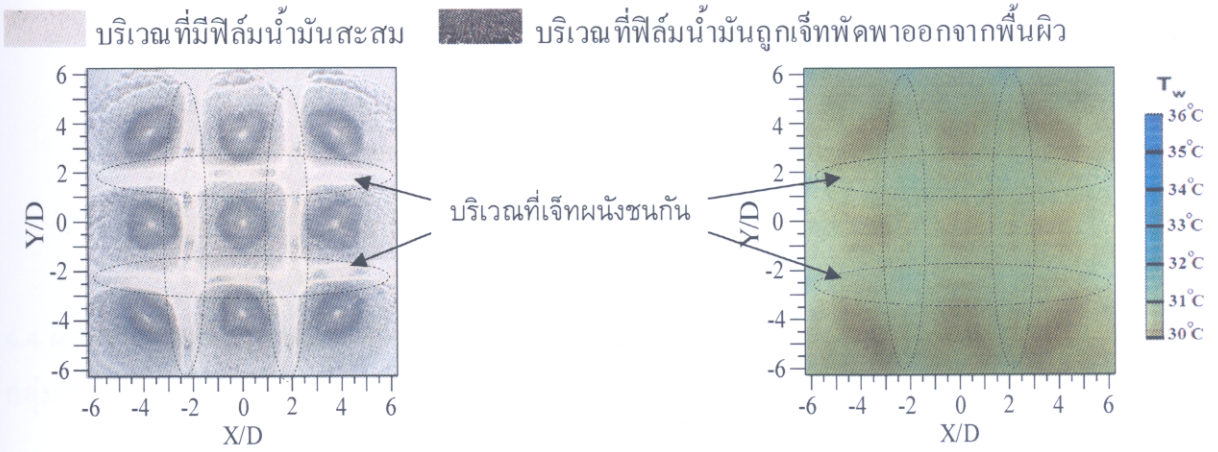


(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.32 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข Sw=0.62 ระยะ L=2D, $\dot{q}$ =207 W/m^2 (T_j=28.5°C, Re=20,000)

รูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 ตามลำดับ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D และ 4D (รูปที่ 4.29 (ก), (ข) และ 4.30 (ก), (ข)) อิทธิพลจากการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางมีผลทำให้การไหลพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางมีบริเวณแคบและมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางมีบริเวณแคบและมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสสอดคล้องกัน ส่วนกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=6D และ 8D (รูปที่ 4.29 (ค), (ง) และ 4.30 (ค), (ง)) พบว่าการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบมีอิทธิพลต่อการจำกัดบริเวณการไหลพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางน้อยลง ทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางมีบริเวณกว้างและมีลักษณะเกือบเป็นรูปวงกลมเหมือนกับลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว (รูป 4.14 (ก) และ 4.15 (ก))

รูปที่ 4.31 และ 4.32 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 และ 0.62 ตามลำดับ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย S=2D (รูปที่ 4.31 (ก) และ 4.32 (ก)) พบว่าลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กัน ส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่เป็นระเบียบเช่นกัน แต่กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมากขึ้น (S=4D, 6D และ 8D) เจ็ทที่อยู่ใกล้กันเกิดการผสมกันน้อยลง ทำให้ลักษณะการไหลบนพื้นผิวมีระเบียบมากขึ้น สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิว ส่งผลทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีระเบียบตามไปด้วย



(ก) ลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมัน (ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec)

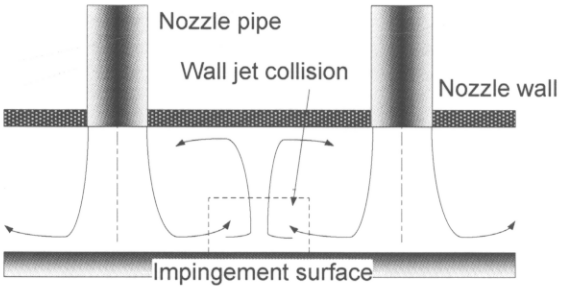
(ข) ลักษณะการถ่ายเทความร้อน ($\dot{q}$ =207 W/m^2)

รูปที่ 4.33 ผลจากการชนกันของเจ็ทผนังทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ที่เงื่อนไขระยะ L=2D และระยะ S=4D (Re=20,000)

สำหรับการไหลบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทจะเกิดปรากฏการณ์การชนกันระหว่างเจ็ทผนังของเจ็ทแต่ละลำบนพื้นผิว โดยเฉพาะกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำและ

ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D สามารถสังเกตผลกระทบจากการชนกันระหว่างเจ็ทผนังที่อยู่ใกล้กัน โดยลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวจากรูปที่ 4.33 (ก) พบว่าบริเวณระหว่างที่เจ็ทพุ่งชนจะเห็นฟิลม์น้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออก ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของรูปที่ 4.33 (ข) ในบริเวณระหว่างที่เจ็ทพุ่งชนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเล็กน้อย

อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนังจะมีผลอย่างมากเฉพาะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ L=2D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย S=2D และ 4D เนื่องจากเป็นช่วงที่ทำให้การไหลบนพื้นผิวมีความเร็วสูงส่งผลต่อการไหลของเจ็ทผนังแต่ละลำที่อยู่ใกล้กันเกิดการชนกันอย่างรุนแรง (ดูรูปที่ 4.33 ประกอบ) แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D, 6D, 8D และ 10D ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S= 6D และ 8D การไหลบนพื้นมีความเร็วต่ำกว่าที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D และ 4D ทำให้ความรุนแรงของเจ็ทผนังแต่ละลำที่อยู่ใกล้กันเกิดการชนกันน้อยลง ทำให้ผลกระทบจากการชนกันของเจ็ทผนังที่มีต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่ปรากฏขึ้น [19]



รูปที่ 4.34 แสดงปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนัง

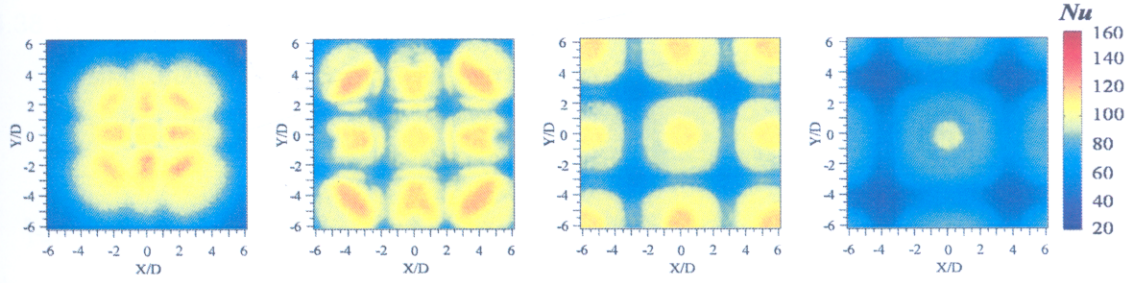
4.4 ผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 4.35-4.38 แสดงผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท โดยพิจารณาผลกระทบของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว สำหรับภาพรวมของผลการทดลองกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย S=2D และ 4D อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมาก S=6D และ 8D

รูปที่ 4.35 และ 4.36 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลำ

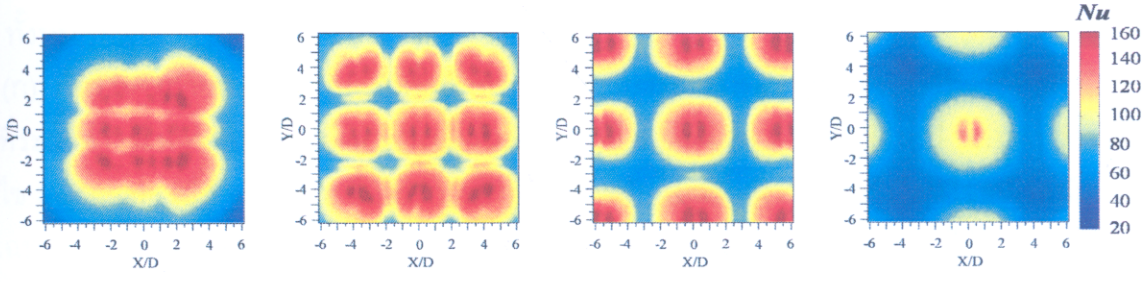
เจ็ท S=2D (รูปที่ 4.35 (ก) และ 4.36 (ก)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทอื่นๆ และเมื่อระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมากขึ้น พบว่าบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำลง โดยเฉพาะที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=8D (รูปที่ 4.35 (ง) และ 4.36 (ง)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำสุดเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างเจ็ทอื่นๆ ในกรณีที่พิจารณาบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D บริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ซึ่งจะแตกต่างกับที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D, 6D และ 8D บริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนที่มีอัตราการถ่ายเทความสูงมีพื้นที่กว้างขึ้น

รูปที่ 4.37 และ 4.38 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D กรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 และ 0.62 ตามลำดับ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D (รูปที่ 4.37 (ก) และ 4.38 (ก)) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างซับซ้อน ไม่สามารถระบุบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนได้ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D (รูปที่ 4.37 (ข) และ 4.38 (ข)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ และที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=6D และ 8D พบว่าบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำลง ในกรณีที่พิจารณาบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีพื้นที่กว้างขึ้น



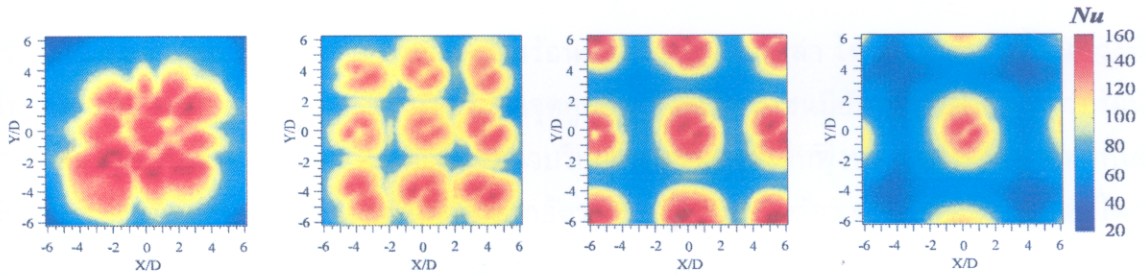
(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.35 แสดงกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ L=2D (Re=20,000)



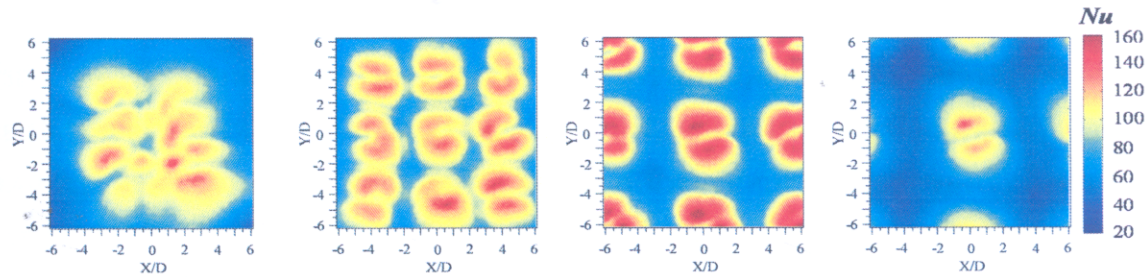
(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.36 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 ระยะ L=2D (Re=20,000)



(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน T_j=28.5°C, $\dot{q}$ =207 W/m^2) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.40 ระยะ L=2D (Re=20,000)



(ก) S=2D (ข) S=4D (ค) S=6D (ง) S=8D

รูปที่ 4.38 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน T_j=28.5°C, $\dot{q}$ =207 W/m^2) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.62 ระยะ L=2D (Re=20,000)

ในกรณีที่เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทั้งหมดของรูปที่ 4.35-4.38 ที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเดียวกัน พบว่าเจ็ทหมุนควงให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและสม่ำเสมอกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่าเฉพาะบางเงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเท่านั้น ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D (เปรียบเทียบรูปที่ 4.35-4.38 ทั้งหมดของรูป (ก)) พบว่าเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 (รูปที่ 4.36 (ก)) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ ทั้งบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.62 (รูปที่ 4.38 (ก)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D (เปรียบเทียบรูปที่ 4.35-4.38 ทั้งหมดของรูป (ข)) พบว่าเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 (รูปที่ 4.36 (ข)) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆเฉพาะบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน แต่สำหรับเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.40 (รูปที่ 4.37 (ข)) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ

สำหรับกรณีที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=6D และ 8D (เปรียบเทียบรูป 4.35-4.38 (ค) และ (ง) ทั้งหมด) เมื่อพิจารณาบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อที่ใส่แผ่นบิดมีอัตราการถ่ายเท

ความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อปล่า โดยเฉพาะเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 (รูปที่ 4.37 (ก) และ (ข)) บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อที่ใส่แผ่นบิดมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า โดยเฉพาะที่เงื่อนไข Sw=0.62 (รูปที่ 4.38 (ค) และ (ง)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ

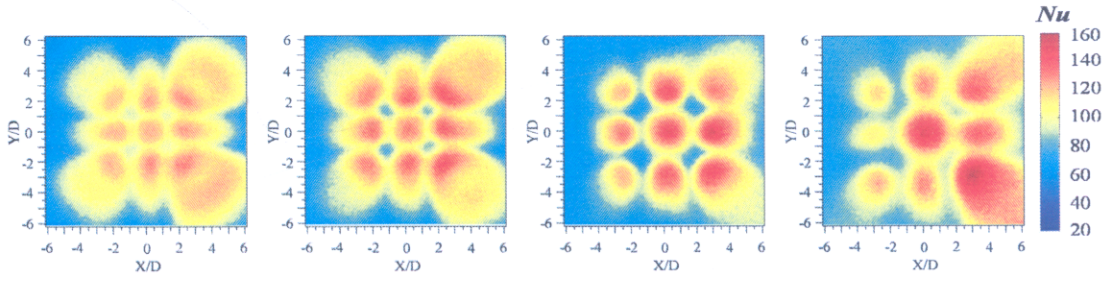
4.5 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีผลต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 4.39-4.42 แสดงผลกระทบของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท โดยภาพรวมของผลการทดลองพบว่า กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D และ 4D (รูปที่ 4.39 และ 4.41) และเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D (รูปที่ 4.42) เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีที่เป็นหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D (รูปที่ 4.40) เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนไม่เป็นระเบียบ

รูปที่ 4.39 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D โดยเปรียบเทียบผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=8D (รูปที่ 4.39 (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ แต่มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนแต่ละลำมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมาก ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีที่ระยะ L=10D (รูปที่ 4.39 (ง)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าที่ระยะ L=8D แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอกว่าที่ระยะ L=8D กรณีที่เพิ่มระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D (รูปที่ 4.41) ผลจากการเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนยังคงเกิดขึ้นลักษณะเดียวกับที่ระยะ S=2D คือ เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น และที่ระยะ L=10D (รูปที่ 4.41 (ง)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุดเมื่อเทียบกับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ โดยที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเดียวกัน

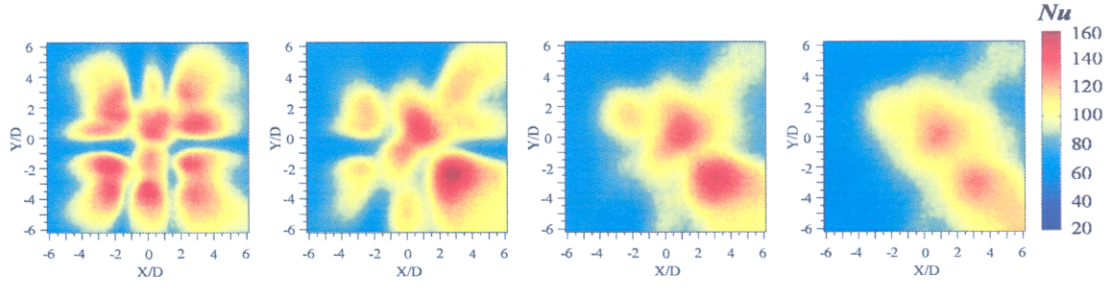
จากรูปที่ 4.39 (ก) แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D จากรูปพบว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทแต่ละลำตรงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแต่ละท่อเจ็ท สามารถสังเกตตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละ

ลำอยู่ในช่วงพิกัด X/D=±2 และ Y/D=±2 ซึ่งตรงกับพิกัดของจุดศูนย์กลางระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท (ดูรูปที่ 4.43 (ก) ประกอบ) เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนทำให้พิกัดตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำเบี่ยงออกนอกตำแหน่งเดิม (ดูรูปที่ 4.43 (ข) ประกอบ) สังเกตได้ชัดที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=10D (รูปที่ 4.39 (ง)) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำอยู่ในช่วงพิกัด X/D=±3 และ Y/D=±3 ในกรณีที่เพิ่มระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D (รูปที่ 4.41) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำตรงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแต่ละท่อเจ็ท อยู่ในช่วงพิกัด X/D=±4 และ Y/D=±4 และที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น พบว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิม จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงการเบี่ยงตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำ จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง เนื่องจากเป็นระยะที่เจ็ทขยายตัวได้มากก่อนพุ่งชนพื้นผิว และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อยเป็นระยะที่เจ็ทเกิดการเบียดกันและเกิดการผสมกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว



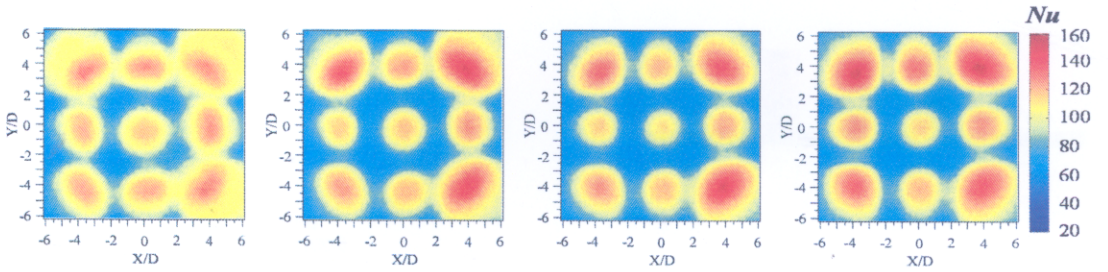
(ก) L=4D (ข) L=6D (ค) L=8D (ง) L=10D

รูปที่ 4.39 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่าระยะ S=2D (Re=20,000)



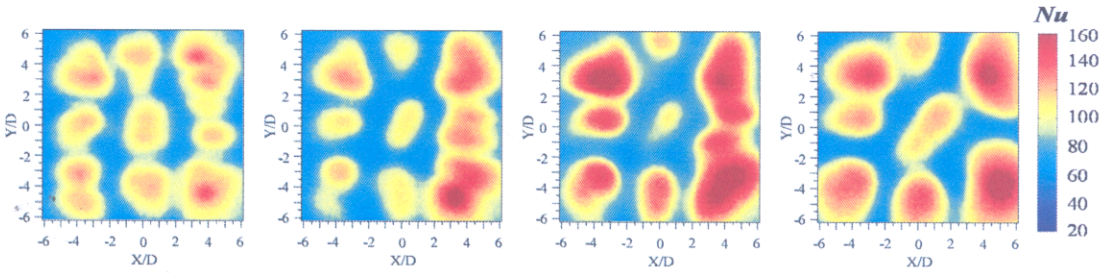
(ก) L=4D (ข) L=6D (ค) L=8D (ง) L=10D

รูปที่ 4.40 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน T_j=28.5°C, $\dot{q}$ =207 W/m^2) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.40 ระยะ S=2D (Re=20,000)



(ก) L=4D (ข) L=6D (ค) L=8D (ง) L=10D

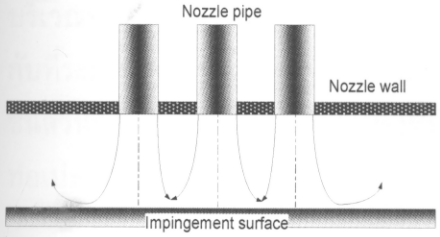
รูปที่ 4.41 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน T_j=28.5°C, $\dot{q}$ =207 W/m^2) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่าระยะ S=4D (Re=20,000)



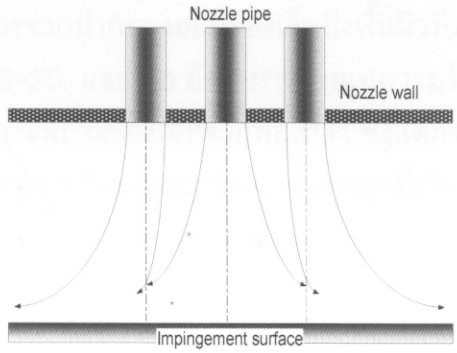
(ก) L=4D (ข) L=6D (ค) L=8D (ง) L=10D

รูปที่ 4.42 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน T_j=28.5°C, $\dot{q}$ =207 W/m^2) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.40 ระยะ S=4D (Re=20,000)

รูปที่ 4.40 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=4D (รูปที่ 4.40 (ก)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอกว่ากรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ ในกรณีที่ระยะ L=6D, 8D และ 10D อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงและจะมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากเป็นช่วงที่ทำให้เจ็ทจะเกิดการผสมกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว โดยเฉพาะที่ระยะ L=10D (รูปที่ 4.40 (ง)) การผสมกันระหว่างเจ็ทเกิดขึ้นอย่างรุนแรงก่อนพุ่งชนพื้นผิว จึงไม่สามารถระบุบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิวได้ แต่ในกรณีที่ระยะ S=4D (รูปที่ 4.42) การผสมกันระหว่างเจ็ทเกิดขึ้นน้อยลง สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิวได้ และที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเดียวกัน เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ระยะ L=8D (รูปที่ 4.42 (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ



(ก) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ L ต่ำ



(ข) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ L สูง

รูปที่ 4.43 แสดงการเบี่ยงจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลาง กรณีที่เงื่อนไขระยะ S น้อย และระยะ L สูง

กรณีที่เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D (เปรียบเทียบรูปที่ 4.39 และ 4.40) พบว่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ L=10D (รูปที่ 4.39 (ง)) และเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ที่ระยะ L=4D (รูปที่ 4.40 (ก)) พบว่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของเจ็ททั้งสองกรณีมีลักษณะที่คล้ายกัน คือพื้นที่ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีขนาดแคบลง (การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้น) และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เกิดขึ้น แสดงถึงการไหลของเจ็ทที่อยู่ใกล้กันเกิดการผสมกันก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าจะเกิดปรากฏการณ์การผสมกันระหว่างเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิวที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้นที่ระยะ L=10D แต่ในขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นที่ระยะ L=4D และเมื่อระยะ L=4D, 6D และ 8D จะเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทมากเกินจนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำลง

กรณีที่เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D (เปรียบเทียบรูปที่ 4.41 และ 4.42) พบว่าผลจากการเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 เพิ่มขึ้น สำหรับเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ L=10D (รูปที่ 4.41 (ง)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอกว่าทีเงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ ขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 ที่ระยะ L=8D (รูปที่ 4.42 (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า

สำหรับผลการทดลองทั้งหมดกรณีกลุ่มของเจ็ทสามารถสรุปผลจากการใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อเปล่าดังนี้ การใช้เจ็ทหมุนควงจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวให้สูงกว่าการใช้เจ็ท

จากท่อเปล่าเฉพาะที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.40 และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D และ 4D โดยที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทลำเจ็ท S=2D และ 4D อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงกว่ากรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ซึ่งแตกต่างกับที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=6D และ 8D อัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงเฉพาะบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนส่วนบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวใกล้เคียงกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของระดับการหมุนควงของเจ็ทที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีของเจ็ทลำเดียวและกรณีกลุ่มของเจ็ทในการทดลองได้ใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อ จำนวน 9 ท่อ เรียงกันเป็น 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิวเรียบ ในการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควงได้ใช้วิธีสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, 8D และ 10D ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D, 4D, 6D, และ 8D สเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.00, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94 และเจ็ทจากท่อเปล่า ในแต่ละการทดลองกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทคงที่เท่ากับ Re=20,000 และนอกจากนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วยวิธีเชิงทัศน์ เพื่อนำผลการทดลองมาใช้ในการอธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) จากผลการศึกษาโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำเดียวพบว่า เจ็ทหมุนควงที่ไหลออกจากท่อจะแบ่งการไหลออกเป็นสองลำเอียงทำมุมกับแกนของเจ็ท เมื่อเจ็ทหมุนควงไหลพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งแตกต่างกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ตำแหน่งของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น กรณีที่เพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทมากขึ้นจะมีผลทำให้มุมของการไหลที่กระทำกับแนวแกนของเจ็ทเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อการแพร่กระจายของเจ็ทและการผสมกันระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆเพิ่มขึ้น และกรณีที่เพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทำให้โครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิวมีความซับซ้อน มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนตามลักษณะการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว

(2) สำหรับผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวพบว่ากรณีที่สเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.40 และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D และ 4D เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่าเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ส่วนบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชน อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงและเจ็ทจากท่อเปล่าแตกต่างกันไม่มาก กรณีที่เพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์เป็น Sw=0.62, 0.78 และ 0.94 จะทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำลง โดยเฉพาะที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=8D และ 10D ผลจากการไหลพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ทลดลงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่า

(3) สำหรับผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D และ 4D การใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อเปล่าสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนและบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชน เฉพาะที่เงื่อนไข สเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.40 และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D และ 4D กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=6D และ 8D เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่าเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ส่วนบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชน อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงและเจ็ทจากทางเปล่าแตกต่างกันไม่มาก

(4) สำหรับผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทที่ สเวิร์ลนัมเบอร์ Sw=0.62, 0.78 และ 0.94 อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า โดยเฉพาะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=6D, 8D และ 10D และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D และ 4D เนื่องจากเกิดการผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กันก่อนพุ่งชนพื้นผิว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลจากการเพิ่มการหมุนควงในการไหลของเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพียงเบื้องต้น ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มขอบเขตในการทำวิจัยดังนี้

(1) ศึกษากรณีกลุ่มของเจ็ทที่มีการจัดเรียงเป็นแบบเยื้องศูนย์กลางระหว่างลำเจ็ท ซึ่งปรกติในกรณีกลุ่มของเจ็ทแบบไม่หมุนควงที่มีการจัดเรียงของลำเจ็ทด้วยวิธีดังกล่าวจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชน

(2) ลดความยาวของแผ่นบิดที่สอดในท่อเจ็ท ซึ่งวิธีดังกล่าวจะทำให้ความดันที่ สูญเสียในระบบลดลง

บรรณานุกรม

[1] Patent US 5,533,864, 1994, "Turbine cooling blade having inner hollow structure with improved cooling".

[2] Patent US 6,000,908, 1999, "Cooling for double-wall structures".

[3] Patent US 5,329,994, 1994, "Jet impingement heat exchanger".

[4] Patent US 4,494,171, 1985, "Impingement cooling apparatus for heat deliberating device".

[5] Ashforth-Frost, S., and Jambunathan, K., 1996, "Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 23, No 2, pp 155–162.

[6] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., and Whitney, C.F., 1997, "Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 14, pp 60–67.

[7] Colucci, D.W., and Viskanta, R., 1996, "Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 13, pp 71–81.

[8] San, J.Y., and Lai, M.D., 2001, "Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 44, pp. 3997–4007.

[9] Rhee, D., Yoon, P., and Cho, H.H., 2003, "Local heat/mass transfer and flow characteristics of array impinging jets with effusion holes ejecting spent air", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp 1049–1061.

[10] Fonet, M., Dorignac, E., and Vullierme, J.-J., 2008, "An experimental study on hot round jets impinging a concave surface", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 29, pp 945–956.

[11] Huang, L., and El-Genk, M.S., 1998, "Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, pp. 583–600.

[12] Wen, M.Y., and Jang, K.J., 2003, "An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 46, pp. 4657–4667.

[13] Lee, D.H., Won, S.Y., Kim, Y.T., and Chung, Y.S., 2002, "Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 45, pp.223–227.

[14] Alekseenko, S.V., Bilsky, A.V., Dulin, V.M., and Markovich, D.M., 2007, "Experimental study of an impinging jet with different swirl rates", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp. 1340–1359.

[15] Bakirci, K., and Bilen, K., 2007, "Visualization of heat transfer for impinging swirl flow", Experimental Thermal and Fluid Science", Vol. 32, pp. 182–191.

[16] Baughn, J.W., and Shimizu, S., 1998, "Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet", Heat Transfer, Vol. 111, pp. 1096–1098.

[17] Kataoka, K., 1990, "Impingement heat transfer augmentation due to large scale eddies", Int. Heat Transfer Conf., pp. 255–273.

[18] Barata, J.M.M., and Dur˜ao, D.F.G., 2002, "Laser-Doppler Measurements of Impinging Jet Flows Through a Cross flow", In Proceedings of the 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon.

[19] Geers, L.F.G., Tummers, M.J., Bueninck, T.J., and Hanjalic, K., 2008, "Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp 5389-5399.

[20] Viskanta, R., 1993, "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 6, pp 111–134.

[21] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A., and Button, B.L., 1992, "A review of heat transfer data of single circular jet impingement", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No. 2, pp 106–115.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

อยู่ในระหว่างการรวบรวมข้อมูลเพื่อที่จะตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมายังขาดข้อมูลที่สำคัญ เช่น การหาค่านัสเวิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว ตัวอย่างผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.3 หน้า 63-66 ซึ่งเป็นข้อมูลล่าสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ใช้ภาพสีระบบ HUE อย่างไรก็ตามด้วยสภาพของการจำกัดในเรื่องของเวลาในการส่งรายงานการทำวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทางทีมวิจัยคาดว่าหากผลงานได้ผ่านการตีพิมพ์ในระดับวารสารวิชาการนานาชาติ ทางผู้รับทุนจะส่งต้นฉบับให้กับทาง สกว.โดยเร็วที่สุด

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

2.1 เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาคธุรกิจ/บุคคลทั่วไป)

ได้รับการตอบรับจากภาคอุตสาหกรรมเพื่อให้คำแนะนำ และอธิบายองค์ความรู้เกี่ยวกับแนวทางการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เจ็ทอากาศ

2.2 เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)

มีการพัฒนาระบบการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิคคริสตัลอย่างต่อเนื่องและได้มีการเผยแพร่การวัดอุณหภูมิด้วยวิธีดังกล่าวสู่ที่ประชุมวิชาการ ทำให้นักวิจัยอื่นๆที่มีงานวิจัยลักษณะเดียวกันให้ความสนใจ และสามารถใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต

2.3 เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

- มีนักศึกษาจบการศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล 1 คน และได้รับการศึกษาต่อเนื่องในระดับปริญญาเอกโดยได้รับความรู้พื้นฐานมาจากงานวิจัยนี้
- มีนักศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล 1 คน อยู่ในระหว่างการศึกษาและพัฒนางานวิจัยนี้
- ทำให้ทีมวิจัยมีความรู้และเพิ่มทักษะเกี่ยวกับการใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิคคริสตัลในการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว

3. การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการในระดับชาติและระดับนานาชาติ

3.1 ประชุมวิชาการในระดับชาติ

1. "การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2551 จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 676-681.

2. "การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทกลุ่มที่พุ่งชนพื้นผิว", การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, วันที่ 13-14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเซีย จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

3. "การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ", การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, วันที่ 13-14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเซีย จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

4. "การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงพุ่งชน", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, วันที่ 15-17 ตุลาคม 2551 กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, หน้า 384-389.

5. "การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนผนังด้วยวิธีเชิงทัศน์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 7, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2552 จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 590-595.

6. "เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หมายเลขบทความ TSF-008060.

7. "การวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล" การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 9) 11 – 12 มีนาคม 2553 ณ อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

8. "การใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลในการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8 22-23 เมษายน 2553 จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 732-737.

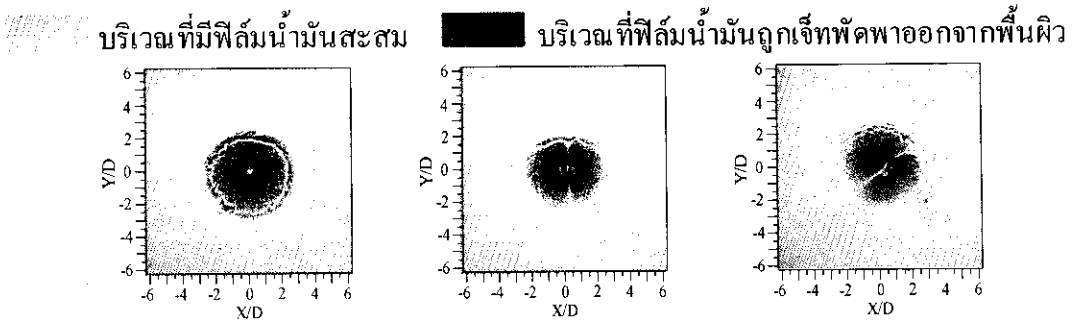
3.2 ประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ

1. "HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMEN" 14th International Symposium on Flow Visualization June 21-24, 2010, EXCO Daegu, Korea.

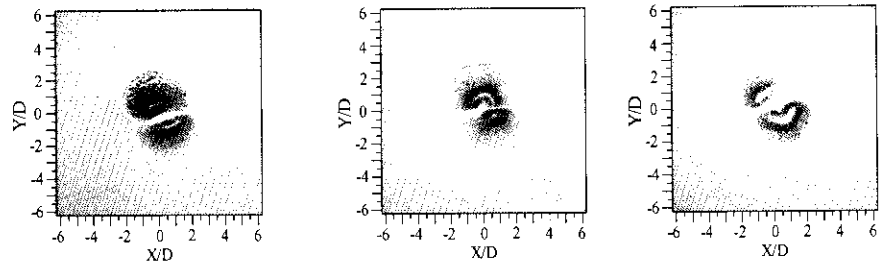
ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน

ภาคผนวก ก.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน

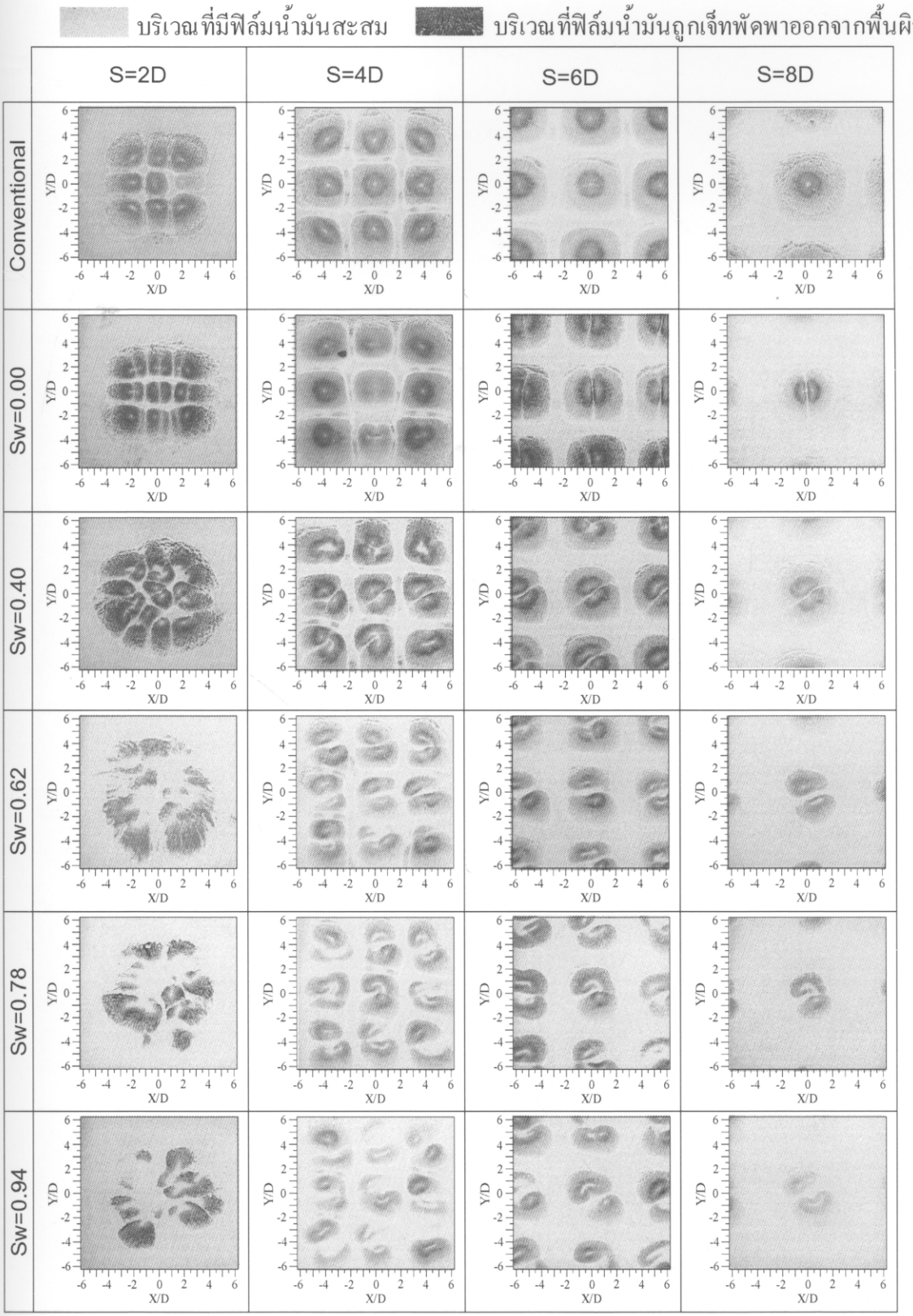


(ก) ท่อเปล่า (ข) Sw=0.00 (ค) Sw=0.40



(ง) Sw=0.62 (จ) Sw=0.78 (ฉ) Sw=0.94

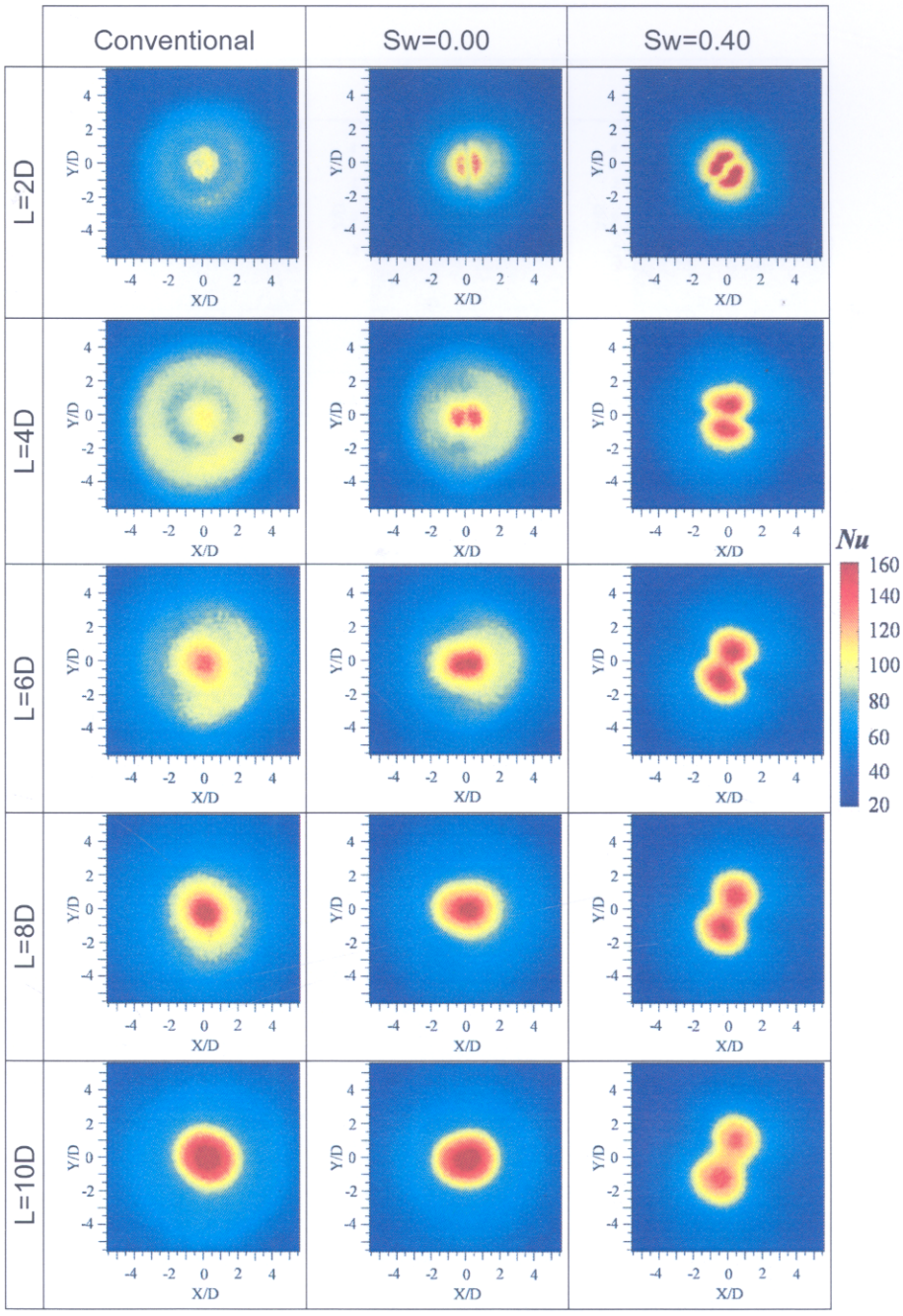
รูปที่ ภก 1 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียวที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ และระยะ L=2D (Re=20,000, ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec)



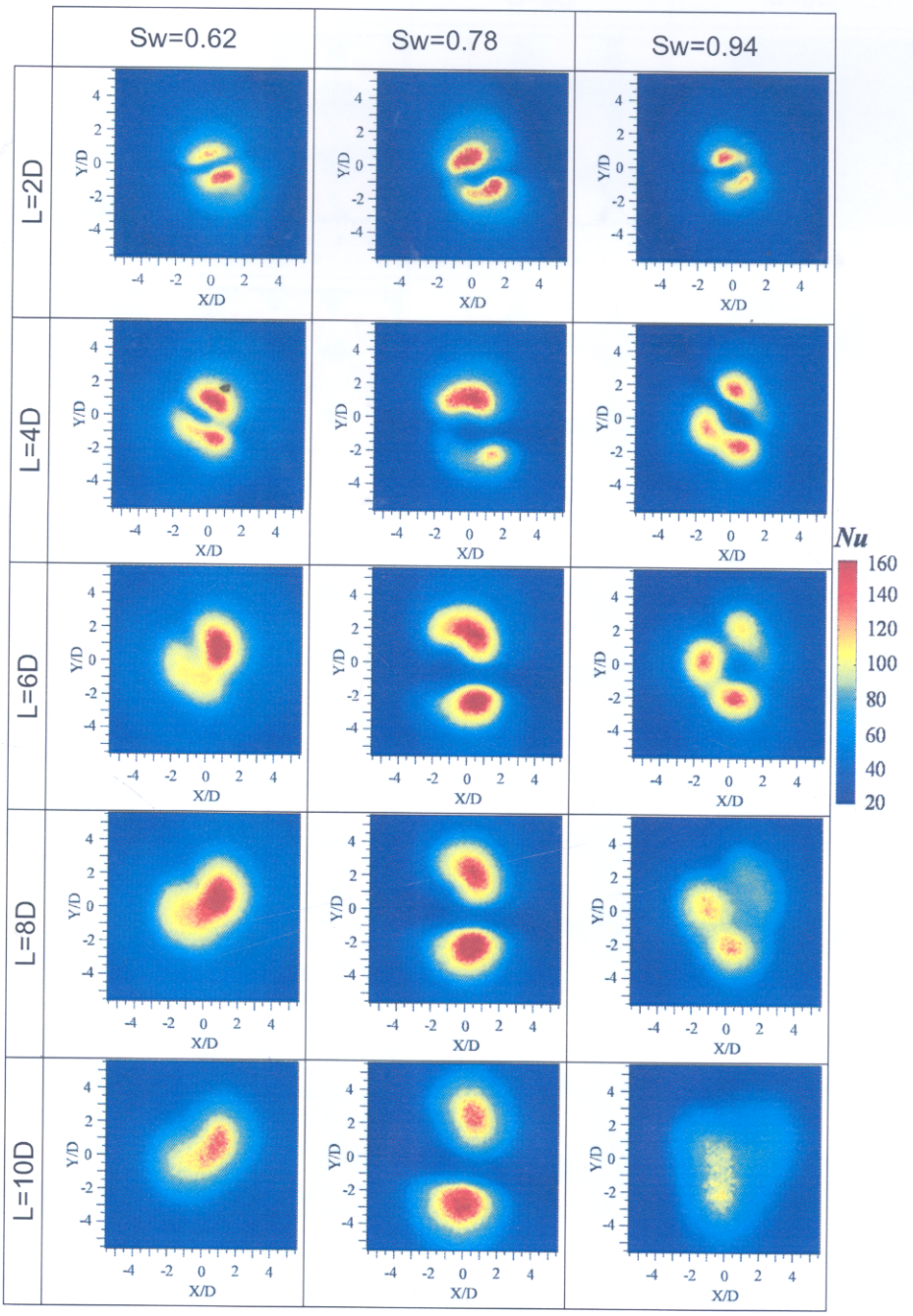
รูปที่ ภก 2 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ทที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ และระยะ L=2D (Re=20,000, ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec)

ภาคผนวก ข

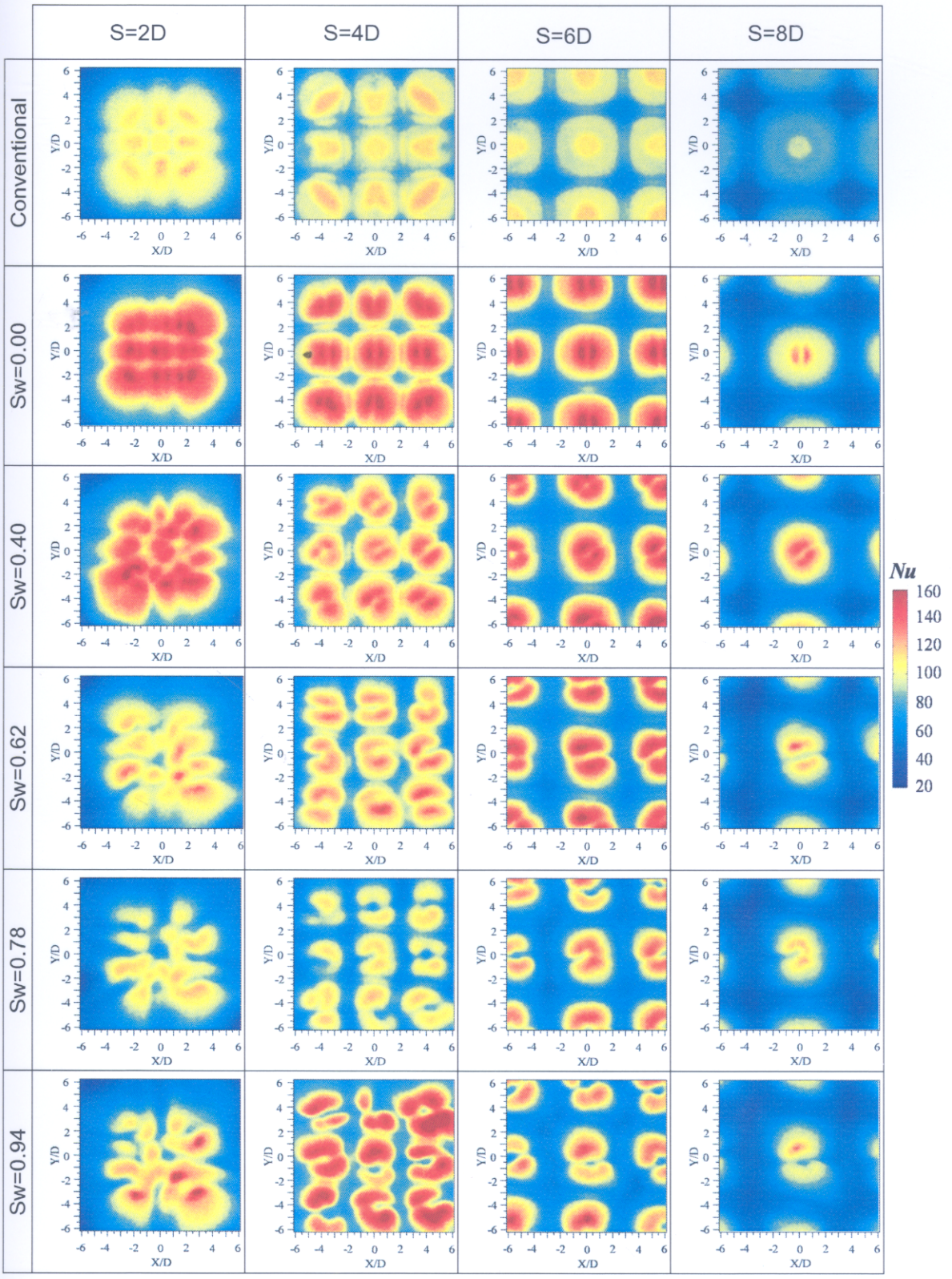
ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว



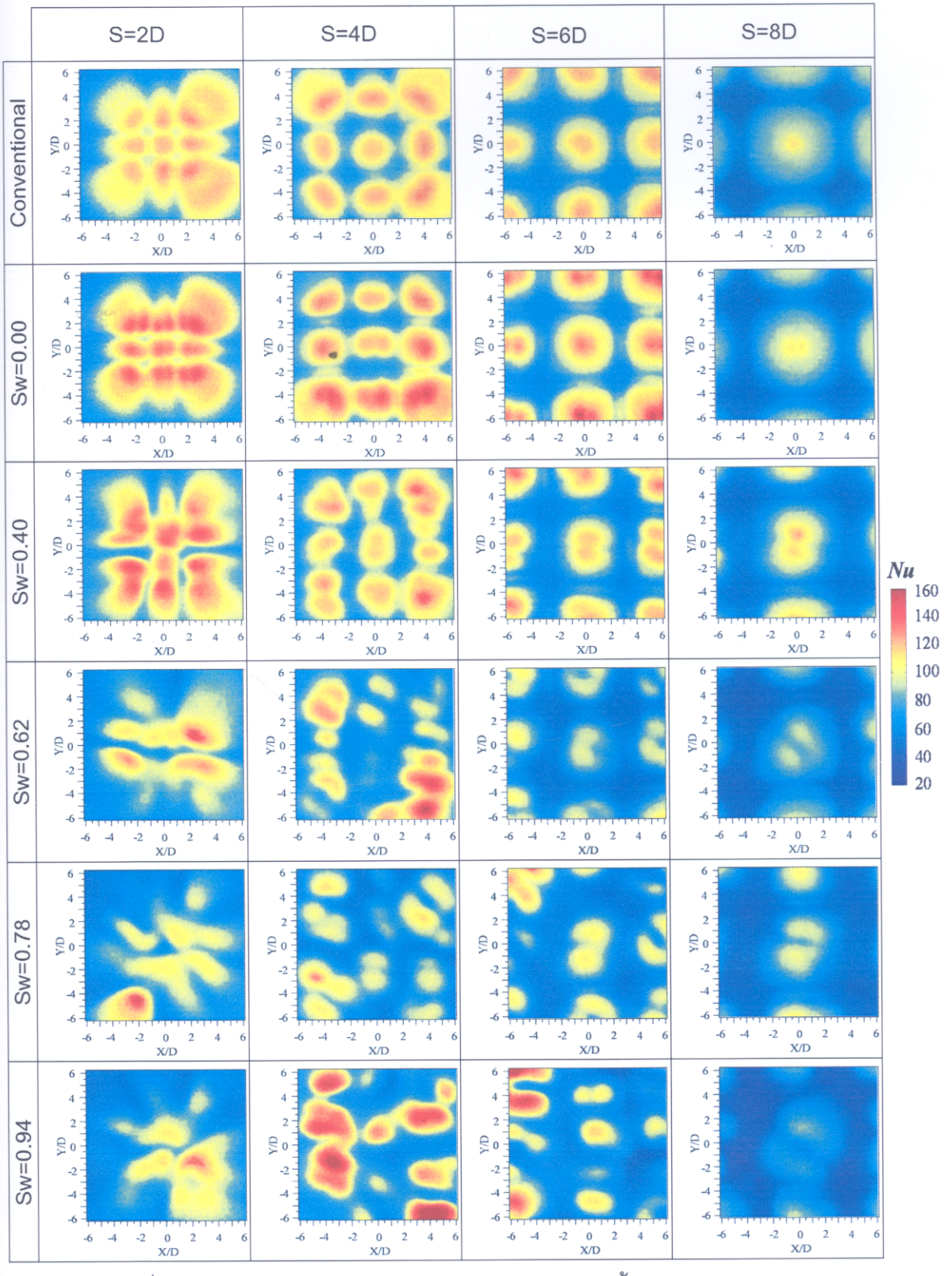
รูปที่ ภข 1 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียว (Re=20,000)



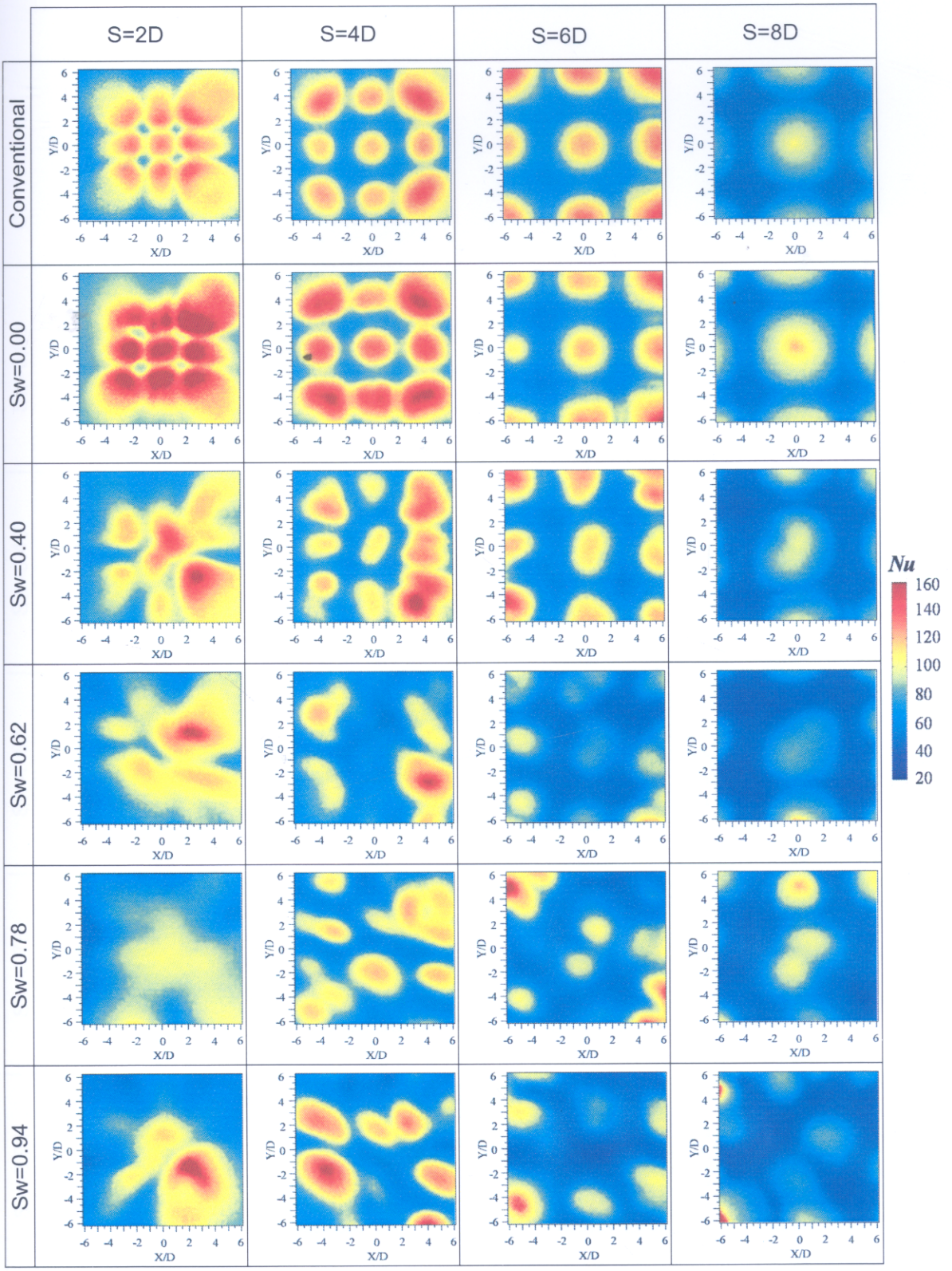
รูปที่ ภข 2 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียว (Re=20,000)



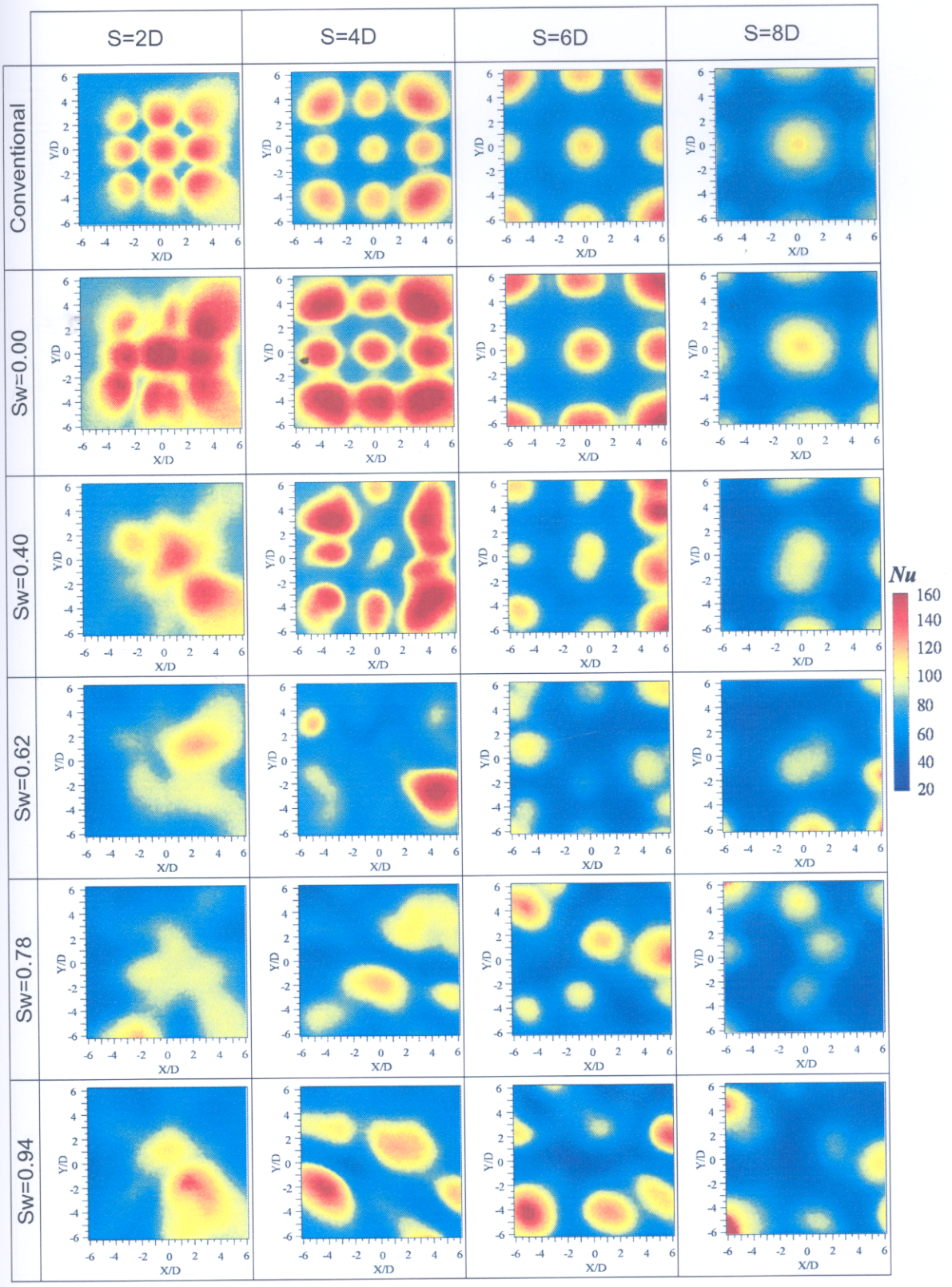
รูปที่ ภข 3 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะ L=2D (Re=20,000)



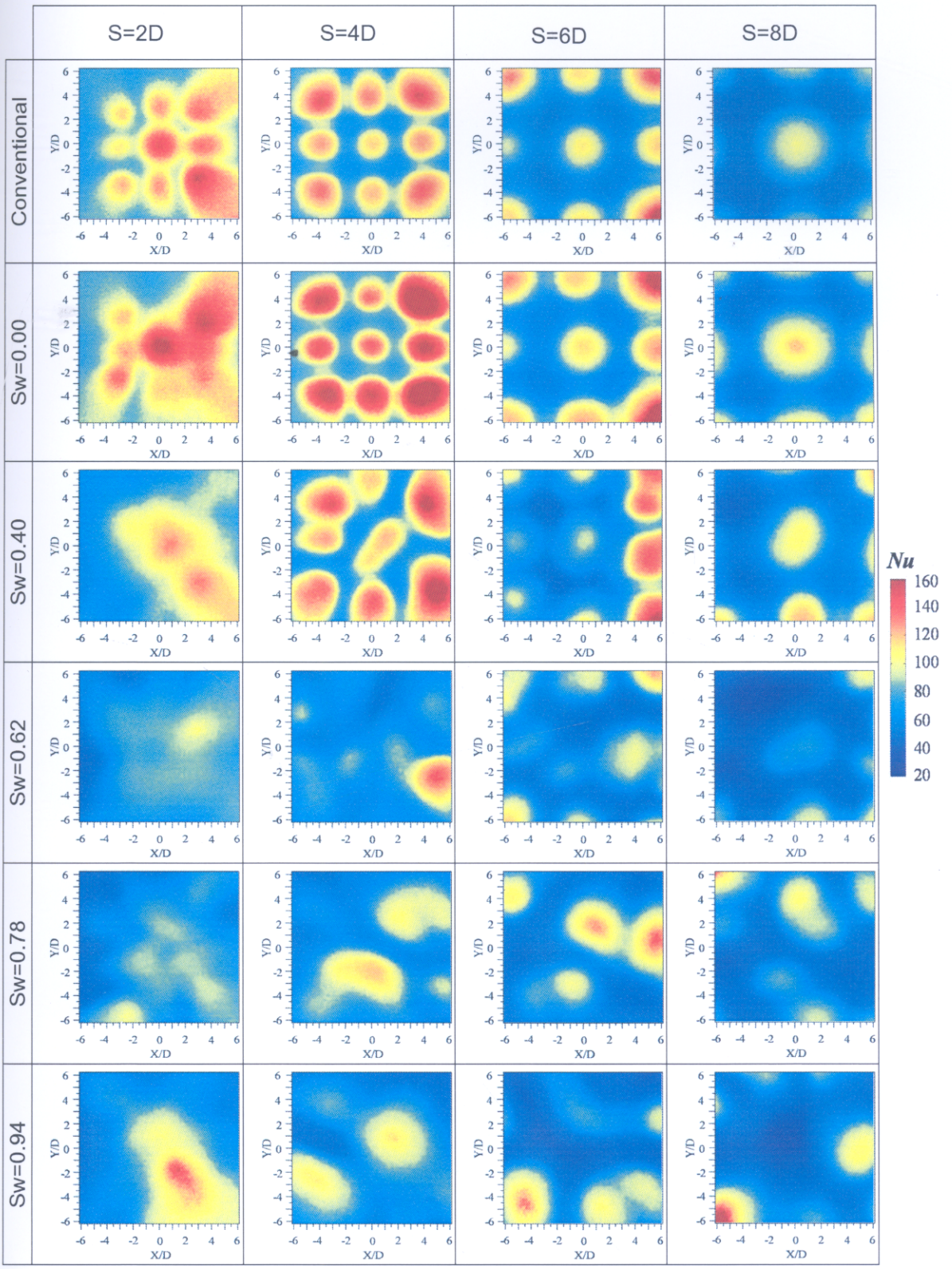
รูปที่ ภข 4 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะ L=4D (Re=20,000)



รูปที่ ภข 5 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะ L=6D (Re=20,000)



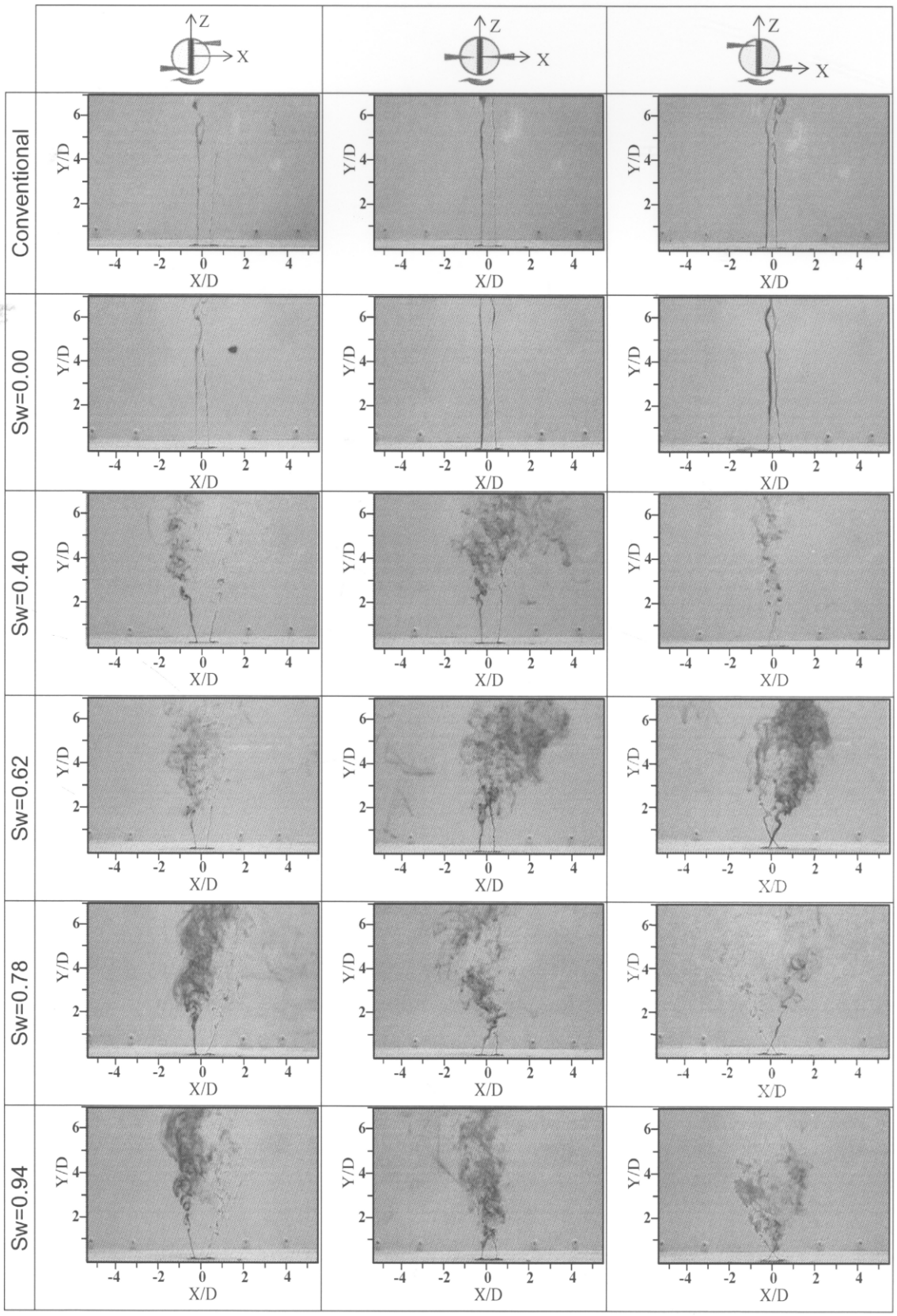
รูปที่ ภข 6 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะ L=8D (Re=20,000)



รูปที่ ภข 7 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะ L=10D (Re=20,000)

ภาคผนวก ค

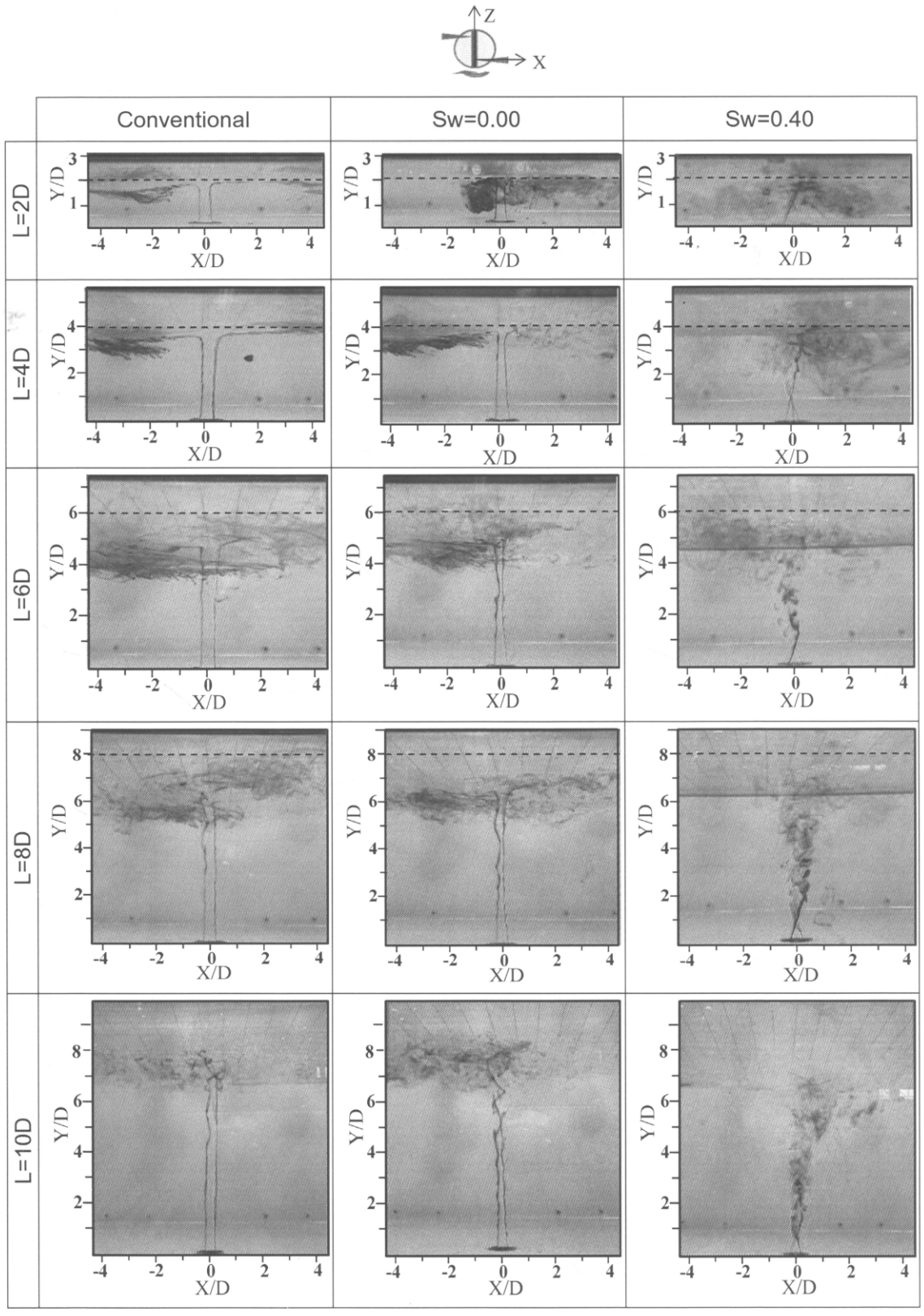
ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ



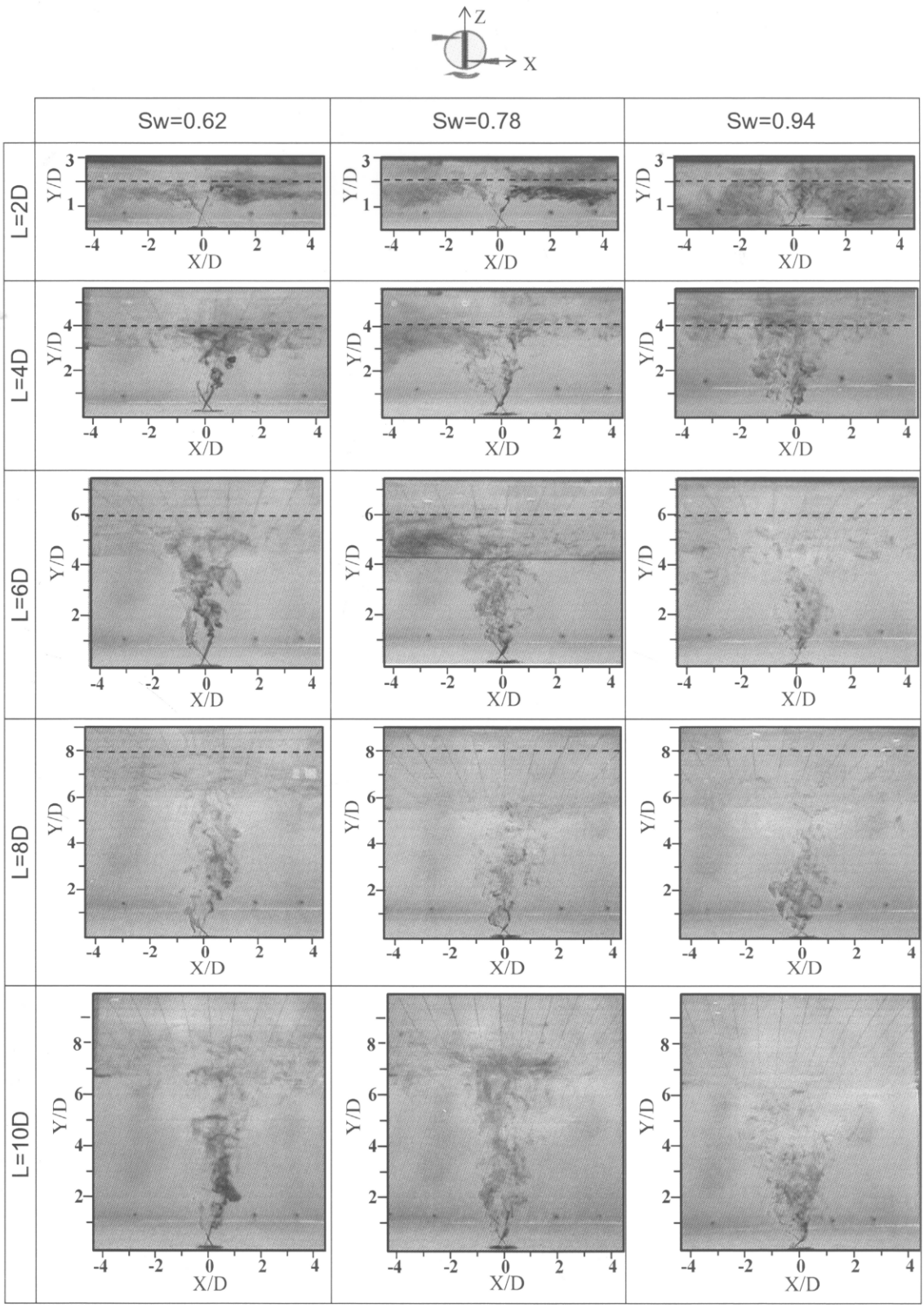
รูปที่ ภค 1 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระกรณีที่วางเข็มฉีดสีที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ (Re=760)

ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว



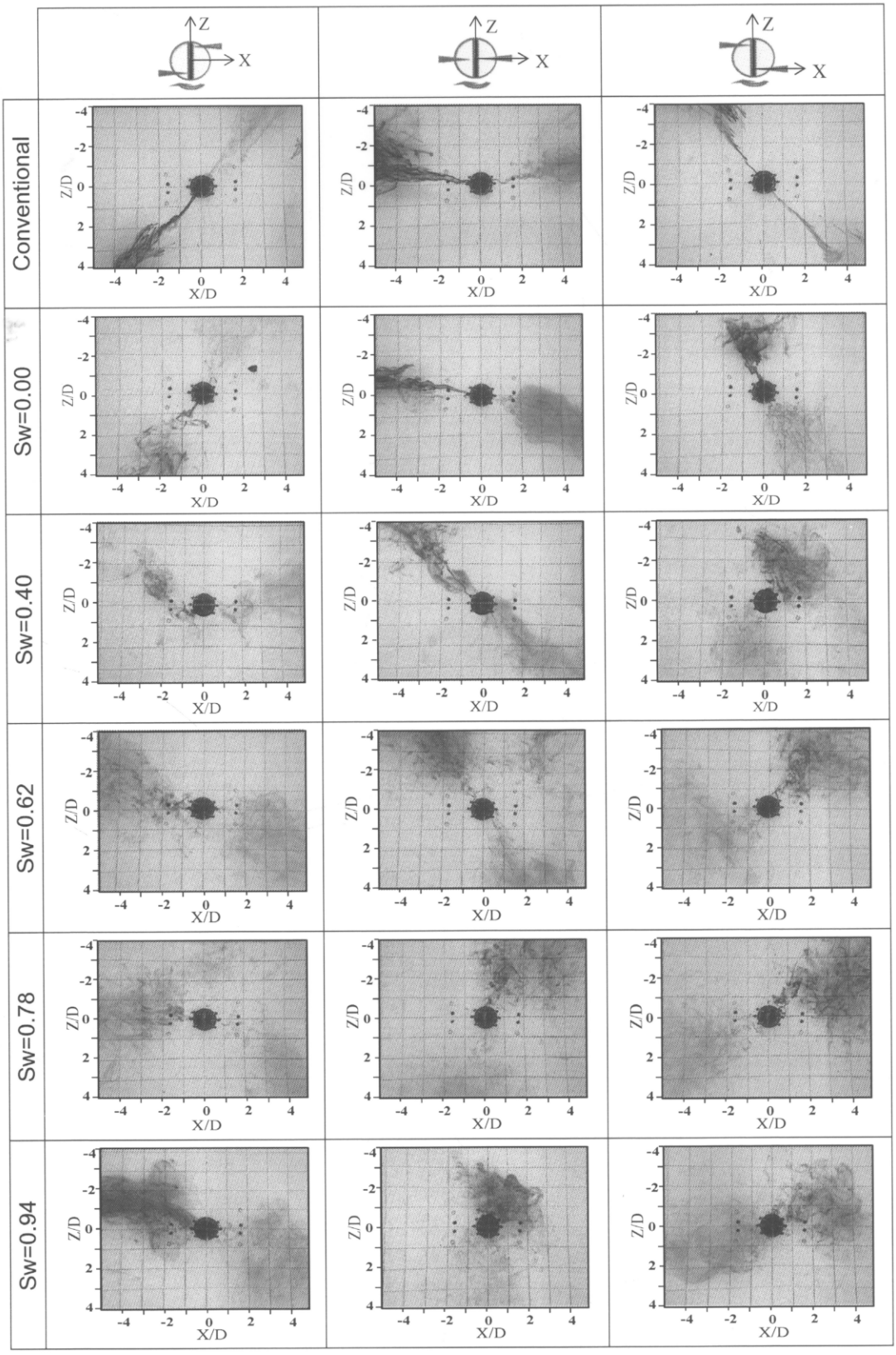
รูปที่ ภง 1 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิวกรณีที่วางเข็มฉีดสีที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ (Re=760, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)



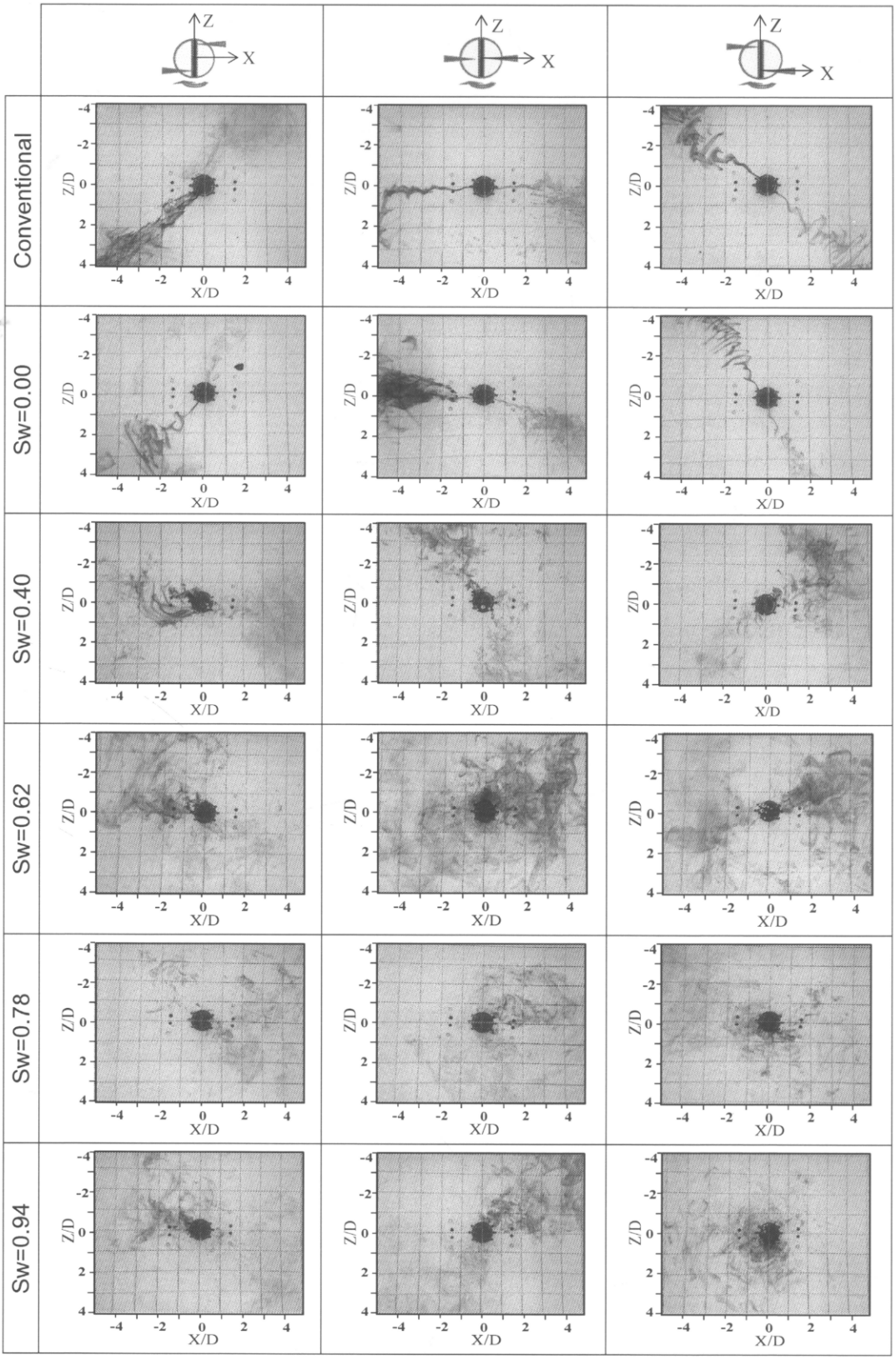
รูปที่ ภง 2 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิวกรณีที่วางเข็มฉีดสีที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ (Re=760, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว



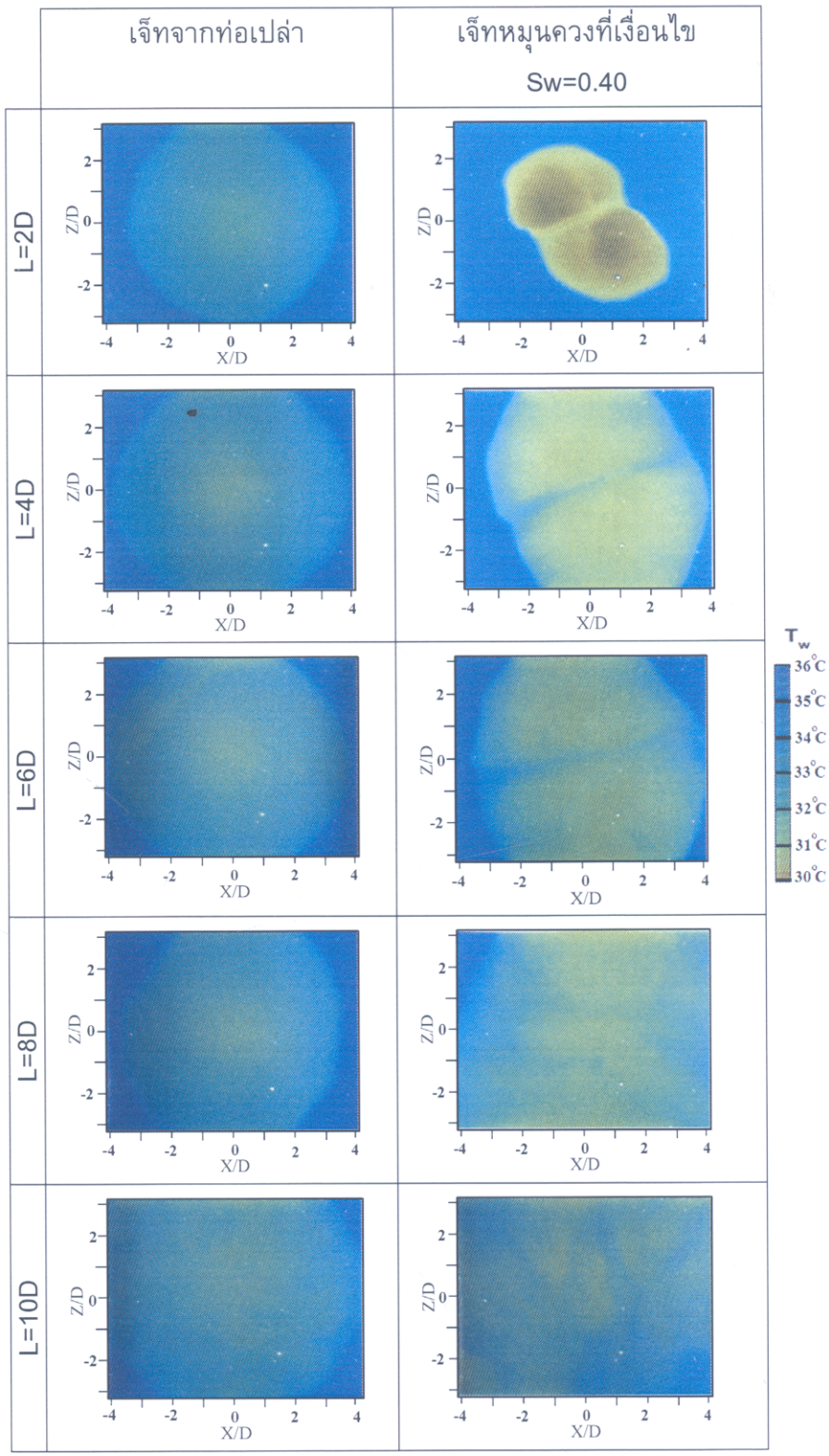
รูปที่ ภจ 1 แสดงการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำกรณีที่วางเข็มฉีดสีที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่าง ๆ ระยะ L=2D (Re=760, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)



รูปที่ ภจ 2 แสดงการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำกรณีที่วางเข็มฉีดสีที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ ระยะ L=4D (Re=760, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

ภาคผนวก ฉ

ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ



รูปที่ ภณ 1 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ

($\dot{q}$ =447 W/m^2, T_j=30°C, Re=760)

ภาคผนวก ซ

การวิเคราะห์ภาพสีโดยใช้ระบบ RGB

ภช การวิเคราะห์ภาพสีโดยใช้ระบบ RGB

ในภาพผนวก ช จะอธิบายถึงการวิเคราะห์ระบบสีแบบ RGB ซึ่งเป็นระบบที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัย จากรูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบสีแต่ละภาพมาแยกให้อยู่ในระบบสี RGB จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบของสี โดยกำหนดให้อยู่ในรูปความเข้มของสี (Color intensity) ที่เป็นตัวแปรไร้มิติตามสมการต่อไปนี้

$$r = \frac{R - RB}{R_{\max} - RB} \qquad \text{(ภช 1)}$$

$$g = \frac{G - GB}{G_{\max} - GB} \qquad \text{(ภช 2)}$$

$$b = \frac{B - BB}{B_{\max} - BB} \qquad \text{(ภช 3)}$$

ในที่นี้ R คือ ความเข้มของสีแดงของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

G คือ ความเข้มของสีเขียวของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

B คือ ความเข้มของสีน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

R_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีแดงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ

G_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีเขียวที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ

B_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของน้ำเงินที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ

RB คือ ความเข้มของสีแดงที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี

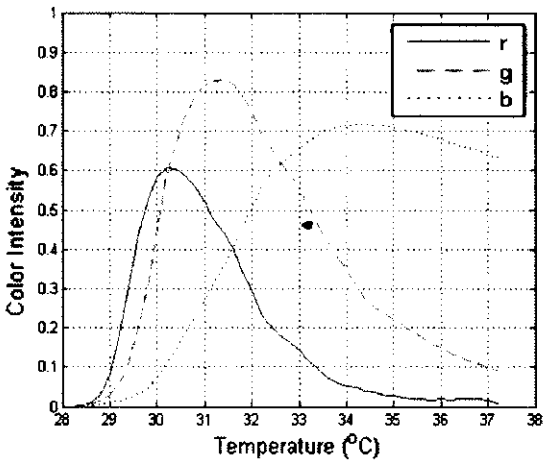
GB คือ ความเข้มของสีเขียวที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี

BB คือ ความเข้มของสีน้ำเงินที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี

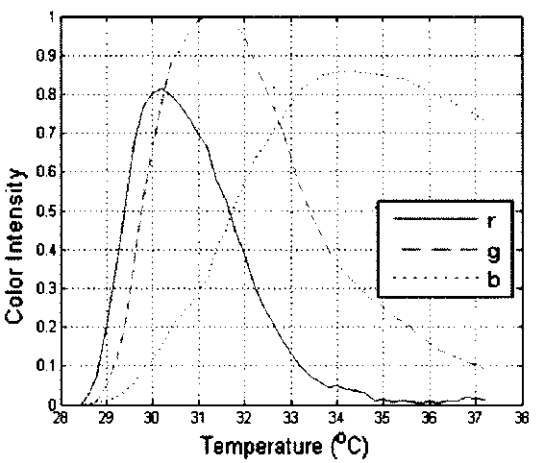
จากสมการที่ (ภช 1) - (ภช 3) ก็จะหาค่าเฉลี่ยความเข้มของสีในรูป 3.6 ทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม MATLAB® ตามที่ได้แสดงในภาพผนวก ภช. 1 จากนั้นสร้างกราฟโดยให้แกนนอนแสดงระดับของอุณหภูมิและแกนตั้งแสดงความเข้มของส่วนประกอบสี rgb จะได้ความสัมพันธ์ของกราฟตามที่ได้แสดงในรูปที่ ภช 1

จากกราฟที่ได้แสดงในรูปที่ ภช 1 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิที่ 28.2 °C เป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลยังไม่ได้แสดงสี (สีดำ) เมื่อทำการแยกตัวประกอบของสี rgb ตัวประกอบของสีทั้งหมดก็จะเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลจะเริ่มแสดงสีทำให้สามารถแยกตัวประกอบสี rgb ได้ ซึ่งจากผลการสอบเทียบทั้งหมดหกครั้ง พบว่าเส้นกราฟ r และ g จะตัดกันที่อุณหภูมิ

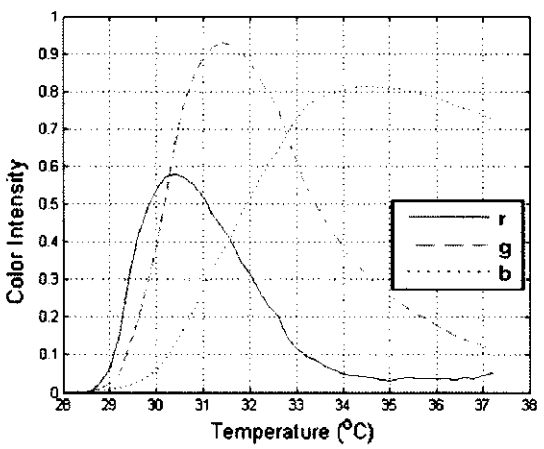
30.2±0.2 °C และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลมีสีเหลืองตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6 (ญ) ในงานวิจัยนี้จะใช้เงื่อนไขเส้นสีเหลืองที่มีส่วนประกอบของสี r ที่มีค่าเท่ากับสี g ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป



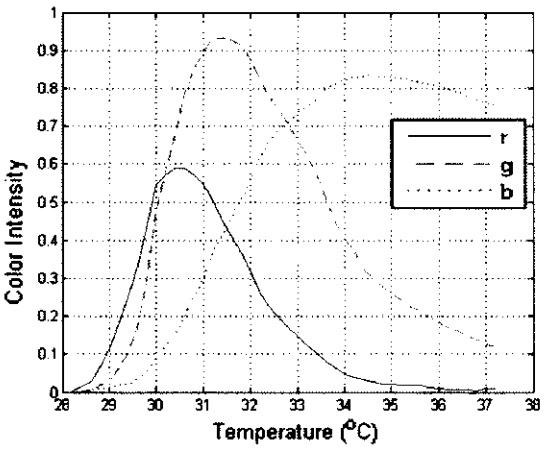
(ก) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 1



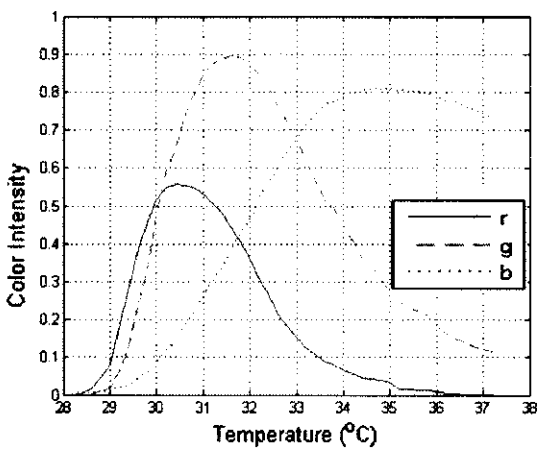
(ข) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 2



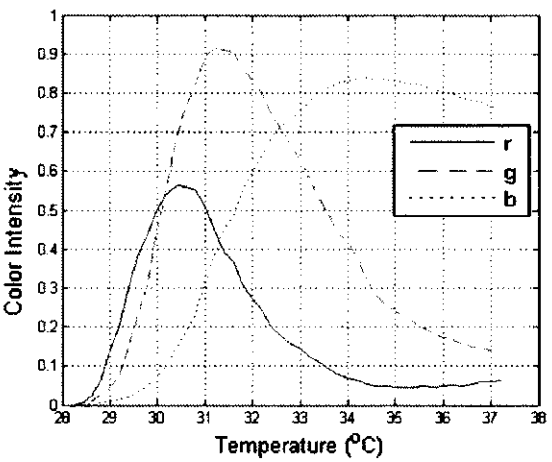
(ค) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 3



(ง) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 4



(จ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 5

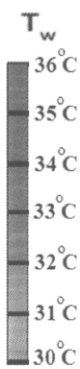


(ฉ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 6

รูปที่ ภช 1 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสี rgb จากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

ตารางที่ ภช 1 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

$\dot{q}$ (W/m^2)	h* (W/m^2 °C)	Nusselt Number*	รูปก่อนผ่านการประมวลภาพ	รูปหลังผ่านการประมวลภาพ **	ลักษณะเส้นสีที่นำมาซ้อนกัน
191	109	69			
207	118	75			
224	128	81			
242	138	88			
260	149	94			
279	159	101			
299	171	108			
319	182	115			



* คำนวณจากสมการที่ (3.8) และ (3.9) โดยใช้เงื่อนไขของเส้นสีเหลือง (T_w =30.2 °C, T_j=28.5 °C)

** เส้นสีขาวแสดงเส้นสีที่มีอุณหภูมิ 30.2 °C ซึ่งมีเงื่อนไขค่า r เท่ากับค่า g ใช้สำหรับแทนนัสเซิลต์นัมเบอร์

ตารางที่ ภช 1 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ โดยที่ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่หนึ่งเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณจากสมการ (3.6) ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่สองเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคำนวณจากสมการ (3.8) และค่าจากตารางในคอลัมน์ที่สามเป็นนัสเซิลต์นัมเบอร์คำนวณจากสมการ (3.9) ในกรณีที่ใช้เส้นสีเหลือง T_w =30.2 $^{\circ}$C และอุณหภูมิของเจ็ท T_j=28.5 $^{\circ}$C ในการคำนวณ

สำหรับวิธีการวัดอุณหภูมิด้วยแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลสามารถหานัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว โดยใช้วิธีการเลื่อนเส้นสีที่รู้อุณหภูมิ (เส้นสีเหลืองแสดงอุณหภูมิเท่ากับ 30.2 $^{\circ}$C) ให้กระจายทั่วทั้งพื้นผิว สำหรับวิธีการเลื่อนเส้นสีที่รู้อุณหภูมิสามารถทำได้โดยการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนโดยให้เส้นสีที่รู้อุณหภูมิเลื่อนทั่วทั้งพื้นผิวตามที่ได้แสดงตัวอย่างของผลการทดลองในคอลัมน์ที่สี่ของตารางที่ ภช 1 ในการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวก็จะทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แผ่นสเตนเลสเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 A

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพได้ดำเนินตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

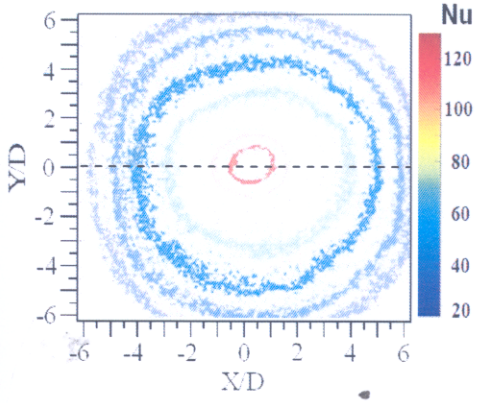
(1) ทำการตัดรูปที่ปรากฏเป็นแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์

(2) สร้างเงื่อนไขที่ r มีค่าใกล้เคียงค่า g ($|r-g|\leq 0.01$) จากนั้นให้คอมพิวเตอร์เลือกจุดสีที่มีเงื่อนไขข้างต้น

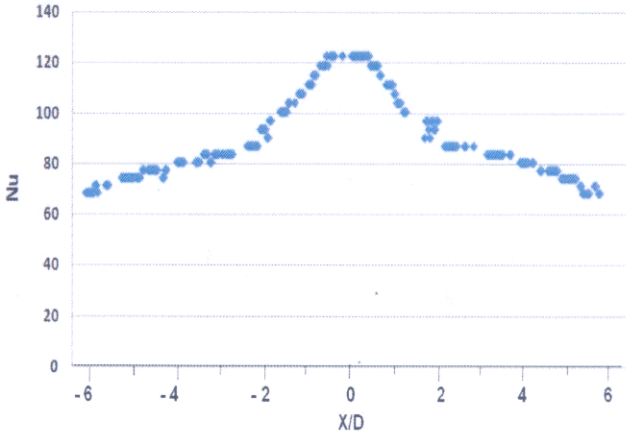
(3) คำนวณนัสเซิลต์นัมเบอร์ของจุดสีตามเงื่อนไขข้อ (2)

(4) ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ (1) – (3) ของรูปทั้งหมด จากนั้นนำนัสเซิลต์นัมเบอร์ทั้งหมดมาซ้อนกันตามที่ได้แสดงในตาราง ภช 1

จากขั้นตอนข้างต้นก็จะได้นัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายตามจุดต่างๆซึ่งผลการทดลองอาจจะแสดงให้อยู่ในรูปความเข้มของสีตามที่ได้แสดงในรูปที่ ภช 2 (ก) หรืออาจจะแสดงที่พิกัดต่างๆตามแกน X หรือ Y ที่อยู่ในรูปกราฟความสูงของนัสเซิลต์นัมเบอร์ สำหรับรูปที่ ภช 2 (ข) เป็นการแสดงกราฟความสูงของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่พิกัด Y/D=0 ตามเส้นประในรูป ภช 2 (ก) อย่างไรก็ตามจากตัวอย่างที่ได้แสดงเพื่อให้เข้าใจได้ง่าย สำหรับวิธีการหานัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว จึงเลือกฟลักซ์ความร้อนที่เพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 1 A แต่ในการทดลองจริงจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 0.5 A



(ก) การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว



(ข) การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามเส้นประในรูป ภช 2 (ก)

รูปที่ ภช 2 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ได้จากการประมวลภาพด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (T_j=28.5 $^{\circ}$C, T_w =30.2 $^{\circ}$C)

ภาคผนวก ซ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว
ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

ภซ 1 โปรแกรม MATLAB® สำหรับสร้างกราฟการแยกตัวประกอบสี rgb ภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ RGB

```
% crop size
p1=265; % position x
p2=257; % position y
p3=124; % colum
p4=78;  % row
rect=[p1 p2 p3 p4];
```

กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
% image file input
name=char(filename(i));
image=imread(name);
```

ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®

```
% crop
imaged=imcrop(image,rect);
```

ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
% divided to R,G,B image
R=imaged(:,:,1);
G=imaged(:,:,2);
B=imaged(:,:,3);
```

ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
% RGB dimensionless
r=(double(R)-double(RB))./(double(RMax)-double(RB));
g=(double(G)-double(GB))./(double(GMax)-double(GB));
b=(double(B)-double(BB))./(double(BMax)-double(BB));
```

กำหนดให้ตัวแปรสี RGB อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติตามที่ได้แสดงในสมการ (3.10)-(3.12)

```
%RGB Average
r1av=sum(r(:))/numel(r);
g1av=sum(g(:))/numel(g);
b1av=sum(b(:))/numel(b);
```

ทำการหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรสี RGB ที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ

ภช 2 โปรแกรม MATLAB® สำหรับหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ RGB

```
% set jet temperature / yel temperature
Tjet=28.5;
Tyel=30.2;
```
กำหนดอุณหภูมิของเจ็ทและอุณหภูมิของเส้นสีเหลือง (เส้นสีที่ทราบอุณหภูมิที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.3.3)

```
%set crop size
cx=403;
cy=402;
rect=[122 39 cx cy];
```
กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
% set current
current=20;
flux=current(i)*current(i)*0.023197/(0.269*0.26);
 h=flux/(Tyel-Tjet);
```
หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากสมการ (3.8)

```
%-------------------------------------
%zero matrix prepared for dump data
M=zeros(cy+1,cx+1);
```
สร้างแมตริกส์ M ที่มีเลขศูนย์ทั้งหมด ซึ่งมีขนาดจำนวนพิกเซลด้านกว้างและด้านยาวเท่ากับขนาดของพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
%image file input
name=char(filename(i))
image=imread(name);
```
ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®

```
%crop
imaged=imcrop(image,rect);
```
ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
%size of cropped image
[a1,b1,c1]=size(imaged);
```
กำหนดตัวแปรเพื่อแทนจำนวนพิกเซลด้านกว้างและด้านยาวของภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
%divided to R,G,B image
R=imaged(:,:,1);
G=imaged(:,:,2);
```
ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
B=imaged(:,:,3);

%normalize r,g,b image
r=(double(R)-double(RB))./(double(RMax)-double(RB));
g=(double(G)-double(GB))./(double(GMax)-double(GB));
b=(double(B)-double(BB))./(double(BMax)-double(BB));
```

หาค่า rgb ให้ตรงกับที่แสดงในเงื่อนไขในสมการ (3.10)-(3.12)

```
for j=1:a1
    for k=1:b1
        if (abs(r(j,k)-g(j,k))<0.01) & (b(j,k)<0.2)
            jj=double(j-a1/2.0);
            kk=double(k-b1/2.0);
            Nu=(h*16.5/1000.0/0.02604);
            imaged(j,k,:)=255;
            M(j,k,:)=Nu;
        end
    end
end
```

หาเส้นสีเหลืองที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลโดยสร้างเงื่อนไขที่ค่า r ใกล้เคียงกับค่า g แล้วแทนค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ลงในแมตริกส์ M ให้ตรงกับพิกัดของเส้นสีเหลือง

ภช 3 โปรแกรม MATLAB® สำหรับสร้างกราฟการแยกตัวประกอบสี H ภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ HUE

```
p1= position x
p2=position y
p3=distance x
p4=distance y
rect=[p1 p2 p3 p4];
```

กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
Hue1=imread(name);
Hue2=imcrop(Hue1,rect);
```

ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®

```
Hue3=double(Hue2)/255;
r=Hue3(:,:,1);
g=Hue3(:,:,2);
b=Hue3(:,:,3);
```

ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
Angle=acos((0.5*((r-g)+(r-b)))./((sqrt((r-g).^2+(r-b).*(g-b))))); %angle
Hue4=Angle;                    %B<=G
Hue4(b>g)=2*pi-Hue4(b>g);      %B>G

H=Hue4/(2*pi);
S=1-3.*(min(min(r,g),b))./(r+g+b);
I=(r+g+b)/3;
```

แปลงจากระบบสี RGB สู่ระบบ HUE

```
%HSI Average
Have=sum(H(:))/numel(H);
```

หาค่าเฉลี่ยค่า H

ภซ 4 โปรแกรม MATLAB® สำหรับหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ กรณีที่วิเคราะห์ระบบสีแบบ HUE

```
I=24.5;
R=0.023197;
A=0.06994; % m^2
q=(I^2)*R/A;
Tj=28.5;
D=0.0165;
Kair=0.02604;
```

เซ็ตตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

```
%crop size Background
pb1= position x
pb2= position y
pb3=distance x
pb4=distance y
rect=[pb1 pb2 pb3 pb4];
```

กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
% load figure
Hue='figure name.jpg';
Hue1=imread(Hue);
Hue2=imcrop(Hue1,rect);
```

ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB®

```
% divided to R,G,B Background image
Hue3=double(Hue2)/255;
r=Hue3(:,:,1);
g=Hue3(:,:,2);
b=Hue3(:,:,3);
```

ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล

```
% RGB to HSI
Angle=acos((0.5*((r-g)+(r-b)))./((sqrt((r-g).^2+(r-b).*(g-b))))); %angle
Hue4=Angle;                    %B<=G
Hue4(b>g)=2*pi-Hue4(b>g);      %B>G
H=Hue4/(2*pi);
S=1-3.*(min(min(r,g),b))./(r+g+b);
I=(r+g+b)/3;
```

แปลงจากระบบสี RGB สู่ระบบ HUE

```
%------------ H to temperature distribition ----------------
 [a,b]=size(H);
Tem=zeros(a,b);

 for j=1:a;
       for k=1:b;
           T=(22183*H(j,k)^6)-(4933*H(j,k)^5)+(43913*H(j,k)^4)
              -(19914*H(j,k)^3)+(4829*H(j,k)^2)-584.5*H(j,k)+56.62;
           Tem(j,k)=T;
       end
  end
```

เซ็ตอุณหภูมิให้เป็นฟังค์ชั่นของค่า H ตามสมการ (3.13) แล้วหาค่าอุณหภูมิที่กระจายบนพื้นผิวแต่ละจุด

```
% ---------temperatue to Nusselt number----------
[a,b]=size(Tem);
Nu=zeros(a,b);
    for j=1:a;
        for k=1:b;
          h=q/(Tem(j,k)-Tj);
          Nu1=h*D/Kair;
          Nu(j,k)=Nu1;
        end
     end
```

คำนวณค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายแต่ละจุด

ภาคผนวก ฌ1

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2551
จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 676-681.

ภาคผนวก ฌ1

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2551
จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 676-681.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6
8-9 พฤษภาคม 2551

การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

A study flow and heat transfer characteristics on a surface with air jet impingement

มักตาร์ แวหะยี[1] ชยุต นันทดุสิต[2]
[1,2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

Makata Waehahyee[1] Chayut Nuntadusit[2]
[1,2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของระยะพุ่งชนของเจ็ท (ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิว) ที่มีต่อพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในกรณีที่เจ็ทอากาศจากท่อพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในการทดลองได้ใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 16.5 mm สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยระยะพุ่งชน L/D = 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยที่ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทกำหนดไว้ที่ 46,400 สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้ใช้วิธีเชิงทัศน์คือ เทคนิคฟิลม์น้ำมันเพื่อดูลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว และศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นTemperature sensitive liquid crystal (TLC) ในการวัดการกระจายอุณหภูมิและคำนวนหาการกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากการทดลองพบว่าที่ระยะ L/D=8 มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบนพื้นผิว

คำหลัก เจ็ทพุ่งชน, พฤติกรรมการไหล, คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน

Abstract

In this study, flow and heat transfer characteristic of impinging jet on a surface was investigated. The jet flow from a nozzle pipe which has 16.5 mm in diameter impinges normally to the surface. We also studied the effect of distance between nozzle and impinged surface L/D=2, 4, 6, 8 and 10 at constant jet Reynolds number of 46,400. Flow patterns on an impinged surface were visualized using oil film technique. Heat transfer distributions on a surface were measured using temperature sensitive liquid crystal (TLC) sheet. The experimental results show that the heat transfer rate was maximum when the distance between nozzle and impinged surface L/D is 8.

Keywords: Impinging jet, Flow pattern, Heat transfer characteristic

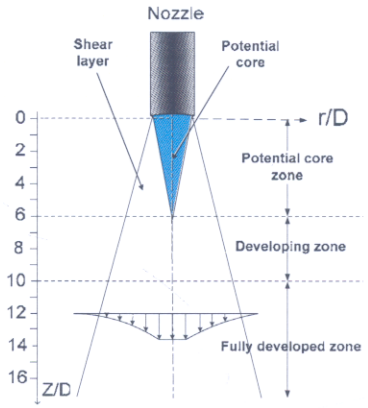
1. บทนำ

การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนสามารถพบได้ในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระบายความร้อน การให้ความร้อนบนพื้นผิว ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมผลิตแก้ว อุตสาหกรรมแผ่นโลหะ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิวเป็นวิธีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่ง ที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงบนพื้นผิว เหมาะสำหรับงานที่ต้องการระบายความร้อนหรือให้ความร้อนแบบรวดเร็ว อีกทั้งวิธีนี้มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้

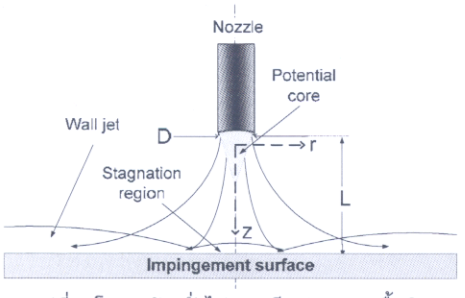
โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ Potential core zone, Developing zone และ Fully developed zone ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ Potential core เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มออกจากหัวฉีด ของไหลมีความเร็วคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด หลังจากที่เจ็ทพุ่งออกจากหัวฉีดจะมีบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหน้าตัดเจ็ทจาก Potential core จนถึงบริเวณที่ของไหลหยุดนิ่งอยู่กับที่เรียกว่า Shear layer และที่ระยะห่างจากปากทางออกหัวฉีด ความหนาของ Shear layer จะเพิ่มขึ้นและขนาดของ Potential core จะลดลงและจะเริ่มหายไปในที่สุด และจะเข้าสู่ช่วง Developing zone ที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วภายในเจ็ทจะค่อยๆลดลงและมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนว

รัศมี ค่าความแปรปรวน (Turbulent intensity) ที่แกนของเจ็ทจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้ หลังจากนั้นก็จะเข้าช่วงFully developed zone เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์แล้ว ซึ่งรูปทรงของหัวฉีดจะมีผลต่อโครงสร้างของการไหลของเจ็ทอิสระอย่างมาก

สำหรับกรณีที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวนั้น จะสามารถแบ่งโครงสร้างการไหลได้ออกเป็น 3 ส่วน คือ Free jet zone, Stagnation zone และ Wall jet zone ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่ Free jet zone จะเป็นช่วงการไหลก่อนเจ็ทจะพุ่งชนผนัง และ Stagnation zone เป็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนผนังและมีการเปลี่ยนทิศทางการไหล และ Wall jet zone เป็นบริเวณที่ของไหลไหลบนผนัง ซึ่งคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเจ็ทอิสระก่อนพุ่งชนผนังและระยะพุ่งชนของเจ็ท



รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของเจ็ทอิสระ



รูปที่ 2 โครงสร้างทั่วไปของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว

Poreh และคณะ [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับระดับของความความแปรปรวนและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนผนัง โดยใช้หัวฉีดที่มีทางออกหน้าตัดรูปวงกลม จากการศึกษาพบว่าบริเวณของเจ็ทผนัง (wall jet) ความเร็วของการไหลจะลดลงและความหนาของชั้นขอบเขตบนผนังจะเพิ่มขึ้น โดยจะแปรผันตรงตามระยะห่างจากจุดกึ่งกลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยทั่วไปแล้วชั้นขอบเขตจำกัดจะเป็นตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังลดลง

Popiel และ Boguslawski [2] ได้เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากหัวฉีดแบบ Orifice และแบบ Bell-shape โดยกำหนดค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่เท่ากัน ผลออกมาคือหัวฉีดแบบ Orifice จะมีความเร็วในแนวศูนย์กลางสูงกว่าหัวฉีดแบบ Bell–shape ส่งผให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ใช้แบบ Orifice จะสูงกว่าแบบ Bell–shape ทุกๆตำแหน่งรัศมีที่เจ็ทกระจายบนผนัง

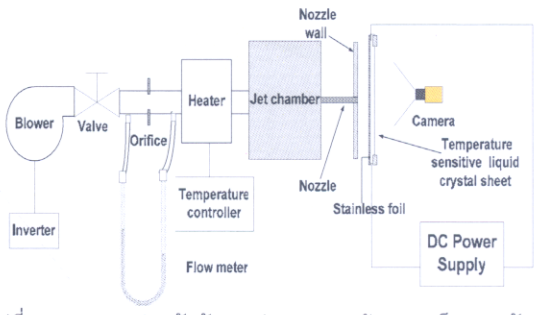
Baughn และ Shimizu [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยใช้หัวฉีดที่เป็นลักษณะท่อยาว ได้เน้นศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงแผ่นระนาบที่เจ็ทพุ่งชน จากการที่ได้ศึกษาปรากฏว่า ที่ระยะเจ็ทพุ่งชน L/D=6 จะมีค่า Nusselt number สูงสุดบริเวณกึ่งกลางเจ็ทพุ่งชน และนอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะ L/D<2 ค่า Nusselt number จะมีค่าสูงสุด (Peak) หลายตำแหน่งตามรัศมีที่เจ็ทพุ่งชน

วัตถุประสงค์ในการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิว โดยใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm ศึกษาในกรณีที่เจ็ทพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะพุ่งชน L/D = 2, 4, 6, 8 และ10 และค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ที่ Re=46,400

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดการทดลอง

เจ็ทอากาศที่ใช้ในการทดลองจะถูกส่งจากโบรเวอร์ ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดด้วยอินเวอเตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะผ่านชุดของออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และชุดฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าถังกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ทไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

2.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนังโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC)

ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวเพื่อระบายความร้อน สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดบนด้านหลังของผนังที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งทำจากสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm

แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 35°C ถึง 40°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC และในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการประมวลภาพในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิตอลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก R, G, B และเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิ

สำหรับการให้ความร้อนแก่ผนังหรือแผ่นสเตนเลสนั้นจะทำโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงผ่านแผ่นสเตนเลส โดยที่อัตราการเกิดความร้อนจากแผ่นสเตนเลสสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q_{input} = \frac{I^2 R}{A} \qquad (1)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และA คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q_{input}}{T_{LC} - T_j} \qquad (2)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทที่ปากทางออก และค่า Nusselt Number บนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \qquad (3)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

ในการทดลองนี้เนื่องจากการเกิดความร้อนบนผนังสเตนเลสนั้นสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังจึงมีค่าคงที่ และจากสมการ (2) เส้นแถบสีของแต่ละอุณหภูมิจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ เพื่อให้สามารถศึกษาการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลของเจ็ทนั่นคือความเร็วเจ็ทและระยะพุ่งชนให้คงเดิม แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าหรือฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่ง และหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงบันทึกโดยกล้องดิจิตอล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้และหากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

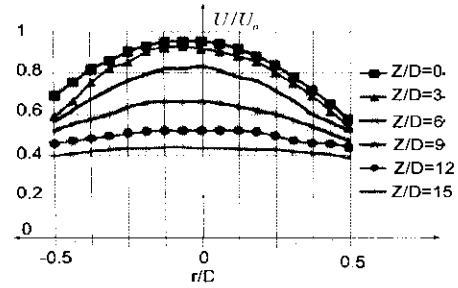
2.3 การศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนังโดยใช้วิธี Oil film technique

ในงานวิจัยนี้เพื่อดูพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวจะใช้เทคนิคฟิลม์น้ำมัน (Oil film technique) ในการศึกษา โดยในการทดลองจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและบนพื้นผิวด้านที่เจ็ทพุ่งชนจะทาชั้นน้ำมันที่มีส่วนผสมของ Paraffin แบบเหลว, ผงTitanium dioxide และกรด Oleic บางๆทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจึงเริ่มให้เจ็ทพุ่งชนผิวน้ำมัน และจะสังเกตุพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวจากการไหลของชั้นน้ำมัน โดยใช้กล้องดิจิตอลบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ

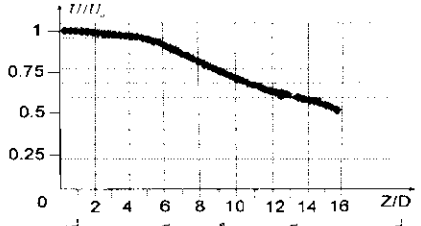
3. ผลการทดลอง

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนผนังของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะใช้เจ็ทจากท่อเจ็ทที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเจ็ท D=16.5 mm มีความยาว 300 mm โดยกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ Re=46400 และเปลี่ยนแปลงระยะพุ่งชนในช่วง L/D= 2, 4, 6, 8 และ 10

3.1 ผลการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ



รูปที่ 4 การกระจายความเร็วของเจ็ทตามแนวรัศมี (r/D)ที่ระยะ Z/D แต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 5 การเปลี่ยนความเร็วภายในแกนเจ็ท (r/D=0) ที่ระยะ Z/D ต่างๆ

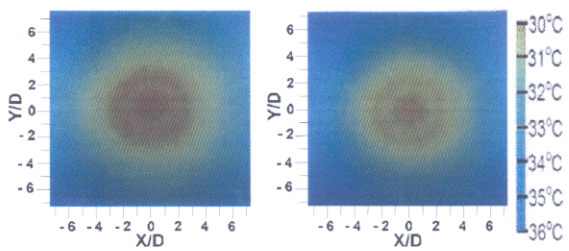
ในงานวิจัยนี้ก่อนการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน ได้ทำการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ โดยที่ U คือค่าความเร็วของเจ็ทในแนวแกนเจ็ท และ U_0 คือความเร็วของเจ็ทที่ปากทางออกที่ตำแหน่งกลางท่อเจ็ท

จากผลการวัดการกระจายความเร็วเจ็ทตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง Z/D ต่างๆ (รูปที่ 4) พบว่าการกระจายความเร็วของเจ็ทที่ตำแหน่งปากทางออก (Z/D=0) มีลักษณะการกระจายแบบพาราโบล่ามีความเร็วสูงสุดที่กึ่งกลางท่อเจ็ท (r/D=0) และจะค่อยๆลดลงมาตามรัศมีท่อเจ็ท และที่ระยะห่างจากปากทางออก Z/D เพิ่มขึ้น

ความเร็วของเจ็ทจะลดลงตามลำดับแต่ยังคงรูปแบบการกระจายตัวแบบพาราโบล่าอยู่อีก

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วในแนวแกนเจ็ทของ (ที่ r/D=0) ที่ตำแหน่ง Z/D ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า จากปากทางออกเจ็ท ความเร็วจะลดลงอย่างช้าๆจนถึงที่ตำแหน่ง Z/D=6 ซึ่งเป็นบริเวณของ Potential core หลังจากนั้นความเร็วจะลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ Z/D>6 เนื่องจากบริเวณ Potential core หมดไป หรือในกรณีที่เจ็ทพุ่งชนผนัง โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนผนังจะลดลงในกรณีที่ระยะพุ่งชนของเจ็ท L/D>6

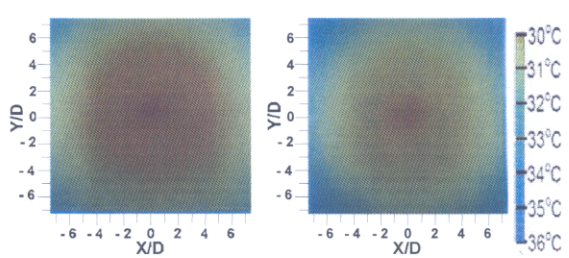
3.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



(a) q= 298 W/m^2 (b) q= 361 W/m^2

(c) q= 430 W/m^2 (d) q= 531 W/m^2

รูปที่ 6 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน L/D=2 เมื่อเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว



(a) q= 298 W/m^2 (b) q= 361 W/m^2

(c) q= 430 W/m^2 (d) q= 531 W/m^2

รูปที่ 7 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน L/D=8 เมื่อเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 6 และ รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างผลการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนบนผนังโดยใช้แผ่น TLC ของกรณีระยะพุ่งชน และ 8 ตามลำดับ และแถบสีในแต่ละรูปแสดงอุณหภูมิของสีต่างๆที่ปรากฏบนแผ่น TLC ที่ได้จากการสอบเทียบสีและอุณหภูมิ ในแต่ละรูปบริเวณที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูง และบริเวณที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำ และในแต่ละรูปหากสังเกตบริเวณแถบสีแดงจะพบว่า เมื่อฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น แถบสีแดงจะเป็นบริเวณที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงขึ้นด้วย และจากผลการทดลองของกรณีระยะพุ่งชน L/D=2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะสูงที่สุดบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (X/D=0,Y/D=0 หรือ r/D=0) และหลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงและจะเกิดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงสุดอันดับที่สองที่ระยะ r/D=2 ห่างจากจุดเจ็ทพุ่งชน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามลำดับเมื่อห่างจากจุดเจ็ทพุ่งชนมากขึ้นระยะพุ่งชน L/D=2

3.3 ผลการศึกษาการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว

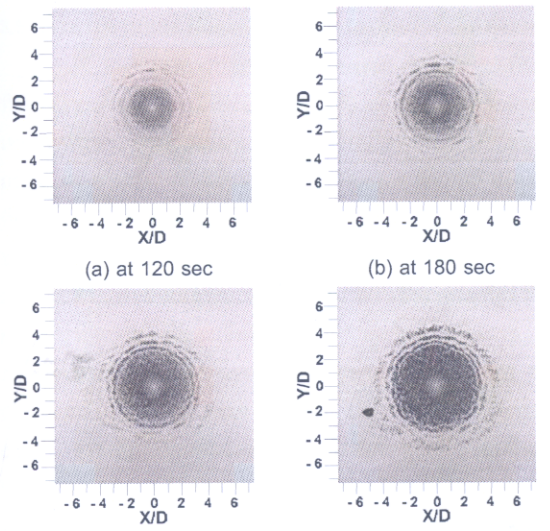
รูปที่ 8 และ รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวโดยเทคนิคฟิลม์น้ำมัน ในกรณีระยะพุ่งชน และ 8 ตามลำดับ ในแต่ละรูปจะแสดงภาพของฟิลม์น้ำมันที่เวลาต่างๆหลังจากที่เจ็ทเริ่มพุ่งชน โดยที่บริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิลม์น้ำมันและบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ไม่มีฟิลม์น้ำมัน

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว และระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งจะเห็นการพัดพาของชั้นฟิลม์น้ำมันเกิดขึ้นเป็นบริเวณต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือ

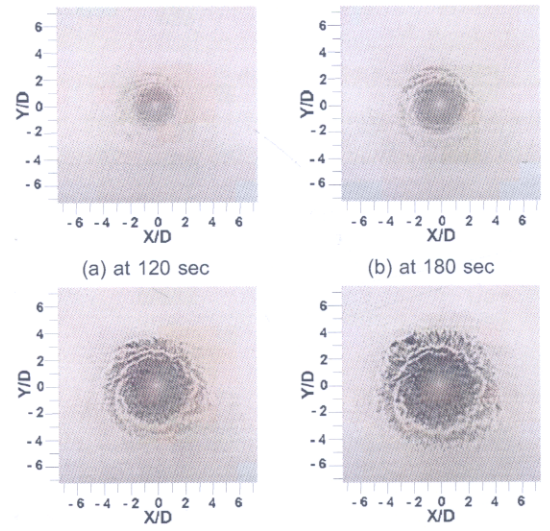
1. Stagnation point เป็นจุดที่ความเร็วเจ็ทเป็นศูนย์ ไม่มีการพัดพาของชั้นฟิลม์น้ำมัน หากสังเกตจะพบว่ามี ฟิลม์น้ำมันบางๆติดอยู่บริเวณจุดพุ่งชนทุกๆผลการทดลอง

2. Stagnation region เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางความเร็วที่ไหลออกจากเจ็ทในแนวแกนเมื่อชนพื้นผิวจะเปลี่ยนทิศทางเป็นแนววัศมีอย่างกระทันหัน ซึ่งก่อนที่เจ็ทจะเปลี่ยนทิศทางในแนววัศมี ความเร็วของเจ็ทในแนววัศมีจะเป็นศูนย์จากนั้นจึงเพิ่มความเร็วขึ้น บริเวณนี้จะมีการพัดพาของชั้นฟิลม์น้ำมัน มากที่สุด หากสังเกตุผลการทดลองบริเวณนี้จะไม่มีคราบฟิลม์น้ำมัน จากผลการทดลองพบว่ากรณีระยะพุ่งชน L/D=2 จะมีบริเวณนี้กว้างกว่ากรณีของ L/D=8

3. Wall jet region เป็นบริเวณที่เจ็ทไหลรอบๆ Stagnation region บนผนังหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลงและชั้นขอบเขตการไหลบนผนังจะค่อยๆหนาขึ้น และมีลักษณะเป็นจุดขาวหรือเส้นขาวของฟิลม์น้ำมันบนพื้นผิว สามารถสังเกตได้ชัดเจนในกรณีระยะพุ่งชน L/D=8



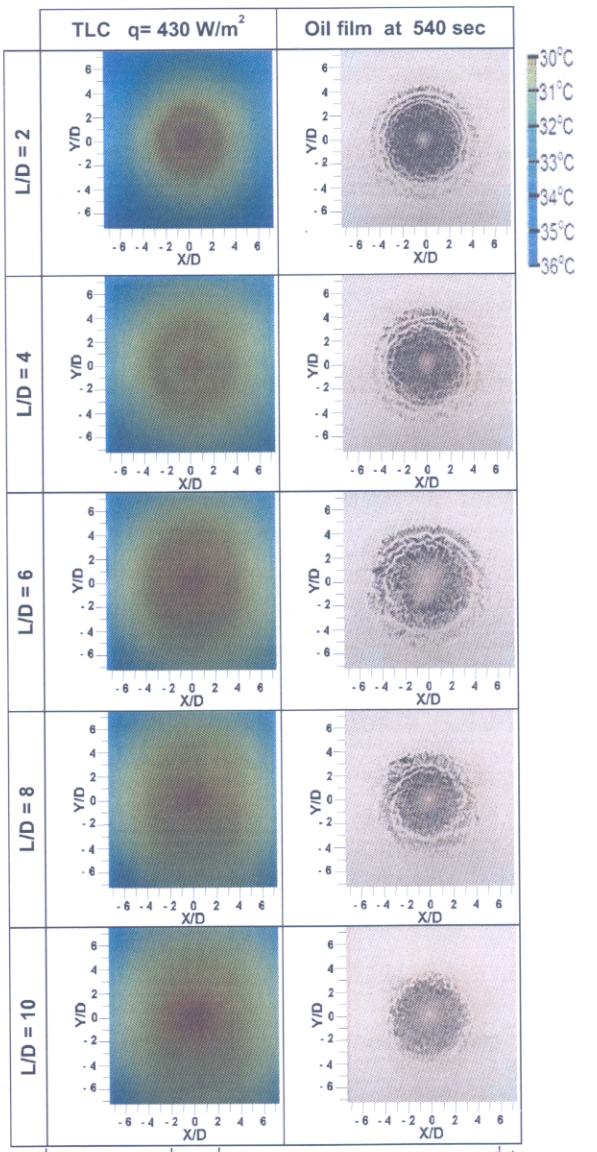
รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟิลม์น้ำมันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีระยะพุ่งชน L/D=2 ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของฟิลม์น้ำมันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีระยะพุ่งชน L/D=8 ที่เวลาต่างๆ

3.4 การเปรียบเทียบผลกระทบจากระยะพุ่งชนของเจ็ท

รูปที่ 10 เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทและการไหลของเจ็ทบนผนังที่พุ่งชนบนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน L/D=2, 4, 6, 8 และ 10 โดยที่ผลการทดลองการการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังคงที่ q= 430 W/m^2 และผลการทดลองการไหลของเจ็ทบนผนังได้หลังจากที่เจ็ทเริ่มพุ่งชน 540 sec จากผลการเปรียบเทียบพบว่าที่ทุกระยะพุ่งชน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชน r/D=0 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามแนวรัศมีที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน และในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=2, 4 จะปรากฏบริเวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดอันดับที่สองที่ตำแหน่ง r/D=2 ในขณะที่ระยะพุ่งชน L/D=6, 8, 10 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวรัศมีจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน

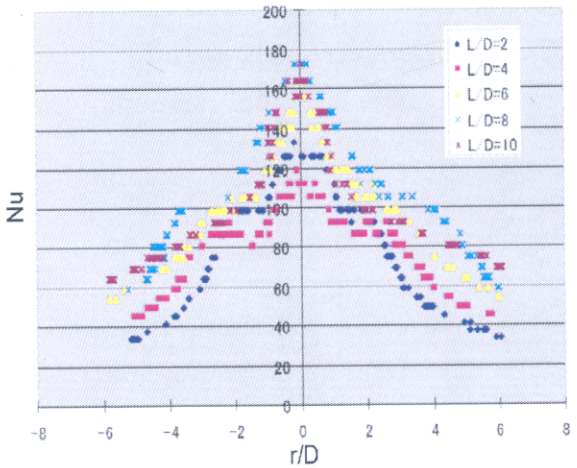


รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลจากระยะพุ่งชน L/D ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว

จากการเปรียบเทียบผลของการไหลบนผนังพบว่า บริเวณของ Stagnation region จะกว้างมากที่สุดที่ระยะพุ่งชน L/D=2 และเมื่อระยะพุ่งชน L/D เพิ่มขึ้นบริเวณของ Stagnation region จะลดลงตามลำดับ เนื่องจากที่ระยะพุ่งชน L/D=2 และ 4 Potential core ของเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง แต่เนื่องจากที่ระยะห่างจากปากทางออก Z/D>6 Potential core ของเจ็ทจะหมดไปและความเร็วของเจ็ทที่ชนผนังจะลดลง ทำให้โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนผนังจะลดลง และบริเวณของ Stagnation region จะแคบลง แต่สามารถสังเกตบริเวณของ Wall jet region ได้ชัดเจนขึ้น

3.5 การกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 11 แสดงการกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีที่ระยะพุ่งชน L/D ต่างๆ ซึ่งได้จากการใช้เทคนิคประมวลภาพของแผ่น TLC ที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนบนผนังต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ค่า Nusselt number จะสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชนหรือจุด Stagnation point (r/D=0 บนพื้นผิว) ของทุกระยะพุ่งชน โดยที่ค่า Nusselt number สูงสุดที่ตำแหน่งนี้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจจะเกิดจากการที่ความแปรปรวนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวสูงขึ้นจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้ทุกๆระยะพุ่งชน L/D จะมีลักษณะคล้ายกันคือ Nusselt number จะสูงสุดที่จุด Stagnation point จากนั้นจะค่อยๆลดลงตามแนวรัศที่เจ็ทพุ่งชน แต่ที่ระยะ L/D=2 การกระจายตัวของ Nusselt number ค่อนข้างที่จะแตกต่างจากระยะพุ่งชนอื่นๆ คือ ที่ตำแหน่ง r/D ประมาณ -2 และ 2 จะมีค่า Nusselt number สูงสุดอันดับที่สองเกิดขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากการที่ระยะพุ่งชนนี้ Potential core ของเจ็ทที่เป็นช่วงการไหลที่มีความเร็วไกล้เคียงกับที่ปากทางออกของเจ็ทและมีระดับความแปรปรวนค่อนข้างที่จะต่ำพุ่งชนบนผนัง หลังที่เจ็ทไหลในแนวรัศมีแล้วความปั่นป่วนของการไหลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้เกิดเป็นค่า Nusselt number สูงสุดอันดับที่สอง [4] และในบริเวณ 0<r/D<4 พบว่ากรณีระยะพุ่งชน L/D=8 จะมีค่า Nusselt number สูงกว่ากรณีอื่นๆ ทุกตำแหน่ง



รูปที่ 11 การกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีที่ระยะพุ่งชนต่างๆ

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง ในกรณีที่ใช้เจ็ทอากาศเดี่ยวจากท่อเจ็ท พบว่า

(1) ค่า Nusselt number หรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวจะสูงสูดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชนหรือจุด Stagnation point และจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวรัศมีบนพื้นผิวสำหรับทุกระยะพุ่งชน และในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=2, 4 ที่ระยะห่างจากจุดพุ่งชน r/D ประมาณ 2 จะมีค่า Nusselt number สูงสุดอันดับที่สองเกิดขึ้น

(2) ระยะพุ่งชน L/D มีผลต่อค่า Nusselt number สูงสุดที่จุดเจ็ทพุ่งชน เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มมากขึ้นค่า Nusselt number สูงสุดจะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น และที่ระยะพุ่งชน L/D=8 จะมีค่า Nusselt number สูงกว่ากรณีอื่นๆทุกตำแหน่งในบริเวณ 0<r/D<4

(3) ระยะพุ่งชน L/D มีผลต่อโครงสร้างของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนผนัง ในกรณีที่ L/D<6 ส่วน Potential core ของเจ็ทจะพุ่งชนผนังทำให้เกิด Stagnation region บนผนังเป็นบริเวณกว้าง และกรณีที่ L/D>6 เนื่องจาก Potential core ของเจ็ทหมดไป ทำให้โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนผนังน้อยลง สามารถสังเกต Wall jet region บนผนังได้ชัดเจน และการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นนี้อาจเกิดจากความแปรปรวนของเจ็ทและการไหลบนผนังที่เพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)

เอกสารอ้างอิง

[1] Pepeh, M., Tsuei.Y.G. and Cemak, C. R. 1967. Investigation of a turbulent radial wall jet. J. Appl. Mech, 34:457-463

[2] Popiel. C. O. and Boguslawski. L. 1986. Mass or heat transfer in impinging single, round jets emitted by a bell-shaped nozzle and sharp-ended orifice. J. Heat transfer 3:1187-1192

[3] Baughn, J. W. and Shimizu, S. 1989. Heat transfer measurement from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. J. Heat transfer, 111:1096-1098.

[4] Lytle, D., and Webb, B.W., 1991 Secondary heat transfer maxima for air jet impingement at low nozzle-to-plate spacing. J. Experimental heat transfer, Elsevier :776-783

ภาคผนวก ฌ2

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, วันที่ 13-14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเซีย จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทกลุ่มที่พุ่งชนพื้นผิว
HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF MULTIPLE IMPINGING JETS ON A FLAT SURFACE

มักตาร์ แวหะยี
ชยุต นันทตุสิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

อศิ บุญจิตราดุลย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จ.กรุงเทพมหานคร 10330

บทคัดย่อ

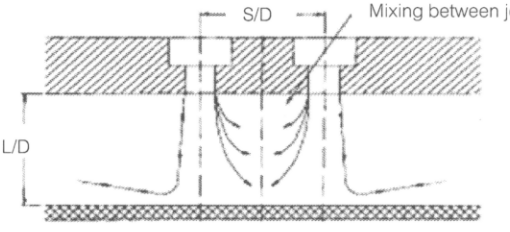
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ในการทดลองนี้ได้ใช้เจ็ทจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ ที่เรียงกันเป็น 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน L/D=2, 4, 6, 8, และ 10 ระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1, 2, 3, 4, และ 5 โดยที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่เท่ากับ 30,000 สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นTemperature sensitive liquid crystal (TLC) วัดการกระจายอุณหภูมิและหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน นอกจากนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน จากการทดลองพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทน้อยจะมีความซับซ้อนเนื่องจากอิทธิพลของลำเจ็ทที่อยู่ติดกันและในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทมากขึ้นจะปรากฏบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนต่ำ และที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1 และระยะพุ่งชน L/D=8 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงและสม่ำเสมอที่สุด

1. บทนำ

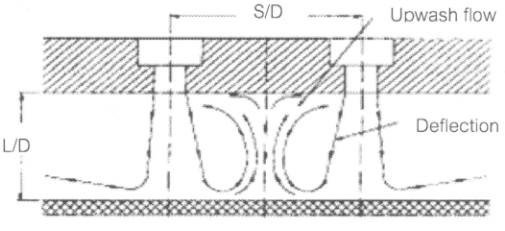
การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเจ็ทของไหลและพื้นผิววิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การระบายความร้อนใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์อิเลคโทรนิค เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงโดยเฉพาะพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว รวมถึงใช้ในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น อุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) แต่ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่หรือกรณีที่ต้องการควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนบนผนังที่สม่ำเสมอ เช่น การให้ความร้อนแผ่นฟิล์ม แผ่นโลหะ จะใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนแทนเจ็ทแบบเดี่ยว

สำหรับการพุ่งชนของเจ็ทเดี่ยวบนพื้นผิว ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนหรือระยะพุ่งชน จะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ทขณะพุ่งชนพื้นผิวและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากเจ็ทของไหลที่ออกจากหัวฉีดจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเจ็ทที่ระยะต่าง ๆ จากหัวฉีด ส่วนโมเมนตัมและความปั่นป่วนภายในเจ็ทขณะพุ่งชนจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

สำหรับกรณีของเจ็ทกลุ่ม โครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนผนังจะซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยว นอกจากระยะพุ่งชนแล้ว การจัดเรียงของเจ็ทและระยะห่างระหว่างเจ็ทจะมีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว กรณีที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดน้อย ก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว จะเกิดปรากฏการณ์การผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ติดกัน ทำให้โครงสร้างการไหลของเจ็ทแตกต่างจากกรณีของเจ็ทเดี่ยว นอกจากนี้หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว จะเกิดปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนัง (Wall jet) ที่อยู่ติดกันแล้วเกิดการไหลขึ้นจากผนัง (Upwash flow) ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังที่บริเวณนี้ซับซ้อนยิ่งขึ้น [1]



(ก) ปรากฏการณ์การผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ติดกัน



(ข) ปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนังที่อยู่ติดกัน

รูปที่ 1 แสดงปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในกลุ่มเจ็ท [1]

San และ Lai [1] ได้ทำการทดลองใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิว 5 ลำ โดยการจัดเรียงหัวฉีดให้ 1 ลำอยู่ตรงกลาง และอีก 4 ลำที่เหลือล้อมรอบเป็นสี่เหลี่ยมโดยที่ด้านกว้างลำเจ็ทจะทำมุมต่อกัน 60° และด้านยาวจะทำมุม 120° โดยที่ค่าเรย์โนลด์ที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง Re=10,000 - 20,000 จากผลการทดลองพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ท โดยที่ระยะพุ่งชน L/D = 8 พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=2 จะเหมาะสมที่สุด และในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D = 2 พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D = 3 จะเหมาะสมที่สุด

นอกจากนี้ San และคณะ [2] ได้ใช้ชุดทดลองรูปแบบเดียวกันทำการทดลองในกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททั้งหมดให้เท่ากัน และอีกกรณีปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบให้แตกต่างกัน โดยทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์ Re=5,000 – 15,000 จากผลการการทดลองพบว่าในกรณีที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทให้เท่ากันทั้งหมด อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะต่ำกว่าเจ็ทที่อยู่รอบ ๆ และกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบให้แตกต่างกัน โดยให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางคงที่และปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่รอบให้สูงขึ้น พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะสูงขึ้นตามการเพิ่มค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่รอบ

Barata [3] ได้ศึกษาเกี่ยวลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน 3 ลำ กรณีเรียงเป็นแถว ผลการทดลองได้เสนอเกี่ยวกับที่มาของการเกิดกระแสไหลวนขึ้น (Upwash flow) ว่าเกิดจากจากเจ็ท 2 ลำที่อยู่ติดกัน หลังจากที่พุ่งชนผนังแล้วเกิดการไหลสวนทางกันบนผนังแล้วเกิดการปะทะและไหลจากผนังขึ้นด้านบน

Brevet และคณะ [4] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนที่เรียงกันแบบ 1 แถว และ 3 แถว ในแต่ละแถวจะมีเจ็ทเรียงกัน 3 ลำ โดยจำลองชุดทดลองให้เหมือนลักษณะการระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ คือ ปรับให้กระแสลมทิ้ง (Spent air) หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนแล้วไหลไปยังทางออกทางเดียว จากผลการทดลองปรากฏว่า เงื่อนไขที่เหมาะสำหรับการจะนำไปใช้จะอยู่ในช่วงระยะพุ่งชน L/D= 2-5 และในช่วงระหว่างนี้ที่ระยะพุ่งชน L/D=3 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และหากมีการเพิ่มค่าเรย์โนลด์พร้อมกับลดระยะห่างระหว่างเจ็ทแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น

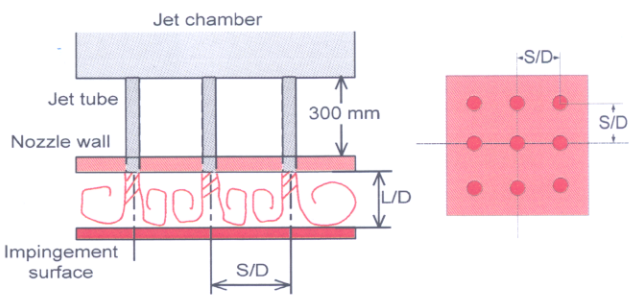
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในกรณีที่เจ็ทอากาศที่พ่นออกมาจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) จำนวน 9 ท่อที่เรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ เนื่องจากในกรณีนี้มีการผสมกันระหว่างเจ็ทที่ติดกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว และการชนกันของเจ็ทผนังบนพื้นผิวเกิดขึ้น ทำให้การไหลและการถ่ายเทความร้อนซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยวมาก โดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ตรงกลางที่ถูกเจ็ทจากทั้งสี่ด้านล้อมรอบ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาผลของระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ทที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ถูกล้อมรอบทั้งสี่ด้านนี้ สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ท โดยที่กำหนดค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เงื่อนไขตัวแปรต่างๆ

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

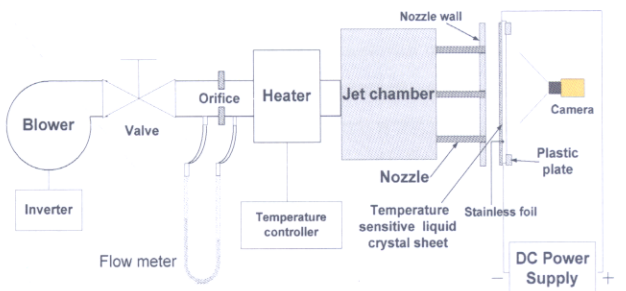
2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของโมเดลการทดลอง ในการทดลองจะใช้เจ็ทจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ เรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทและระยะระหว่างแถวของเจ็ทเท่ากัน สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน L/D=2, 4, 6, 8, และ 10 ระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1, 2, 3, 4, และ 5 โดยที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททุกการทดลองคงที่ Re=30,000 (ใช้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเจ็ทและความเร็วเจ็ทที่กลางปากทางออกท่อในการคำนวณค่าเรย์โนลด์ของเจ็ท)

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบรเวอร์ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดด้วยอินเวอเตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และจะผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าห้องกักอากาศและผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ทไว้ดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน ชุดทดลองนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ทได้



รูปที่ 2 แสดงโมเดลการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC)

ในการทดลองนี้จะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสเตนเลสนี้จะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q = \frac{I^2 R}{A} \qquad (1)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดบนด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 35°C ถึง 40°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC และในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการประมวลภาพในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิตอลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก คือ แดง (R) เขียว (G) น้ำเงิน (B) และเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้จะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่ร้อนเพื่อระบายความร้อน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q}{T_{LC} - T_j} \qquad (2)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทในห้องกักอากาศ และค่า Nusselt Number บนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \qquad (3)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

ในการทดลองนี้ เส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC จะหมายถึงเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิที่คงที่ และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (2) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากันด้วย

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ (ประมาณ 5°C) เพื่อให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลให้คงเดิม (ระยะพุ่งชน ระยะห่างระหว่างเจ็ท ความเร็วเจ็ท และอุณหภูมิของเจ็ท) แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าหรืออัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่งและหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จึงบันทึกภาพแผ่น TLC โดยกล้องดิจิตอล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ และหากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

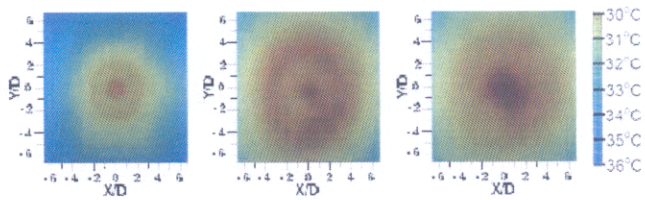
2.3 วิธีการศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนังโดยใช้เทคนิคฟิลม์น้ำมัน (Oil film technique)

ในการทดลองนี้จะศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคเชิงทัศน์ฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) ในการทดลองจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชนแทนแผ่นสเตนเลส และบนพื้นผิวด้านที่เจ็ทพุ่งชนจะทาน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลว ผงไททาเนียมไดออกไซด์และกรดโอเลอิกบางๆ ทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจะให้เจ็ทพุ่งชนผิวน้ำมัน และบันทึกการไหลของชั้นน้ำมันบนพื้นผิวจากด้านหลังของผนังใส โดยใช้กล้องดิจิตอลบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังด้วย TLC

รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองกรณีของเจ็ทเดี่ยวที่ระยะพุ่งชน L/D=2, 6 และ 10 ในรูปแสดงภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่เงื่อนไข q= 242 W/m^2 และ T_j=28.5°C



(a) L/D=2 (b) L/D=6 (c) L/D=10

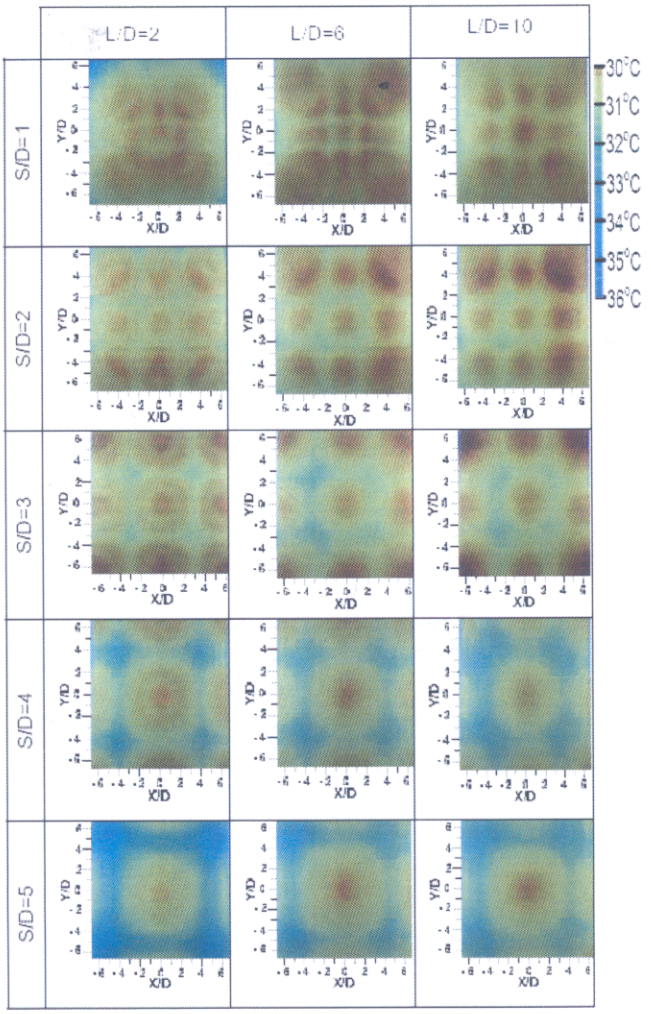
รูปที่ 4 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังของเจ็ทเดี่ยวที่ระยะพุ่งชนต่างๆ (q= 242 W/m^2, T_j=28.5°C, Re=30,000)

สำหรับสีบนแผ่น TLC จะแสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะมีอุณหภูมิต่ำและมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูง ส่วนบริเวณห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนอุณหภูมิจะสูงขึ้นและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองของเจ็ทเดี่ยว พบว่า เมื่อเพิ่มระยะพุ่งชน L/D บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำหรือบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงบนพื้นผิวจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเจ็ทมีการขยายหน้าตัดตามระยะจากปากทางออกเจ็ท หรือเมื่อระยะพุ่งชนมากขึ้น พื้นที่หน้าตัดเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบจากระยะพุ่งชน L/D และระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังของเจ็ทกลุ่ม โดยแต่ละผลการทดลองมีเงื่อนไข q= 242 W/m^2 และ T_j=28.5°C

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างกรณีเจ็ทเดี่ยวและกรณีเจ็ทกลุ่มโดยเฉพาะเจ็ทที่อยู่ตรงกลางที่

ถูกเจ็ทจากทั้งสี่ด้านล้อมรอบ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ถูกล้อมรอบจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว โดยเฉพาะกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=6 และ 10 หรือระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่ำๆ เนื่องจากการไหลของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางถูกจำกัดโดยเจ็ทที่อยู่รอบๆ ทั้งสี่ด้าน และหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแล้วเจ็ทผนังจะถูกจำกัดบริเวณการไหลโดยเจ็ทผนังจากทั้งสี่ด้าน สังเกตได้จากกรณีของ L/D=2 และระยะห่างระหว่างเจ็ทในช่วง S/D=1-3 จะมีการกระจายอุณหภูมิของเจ็ทลำตรงกลางเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจตุรัส



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทกลุ่ม (ที่เงื่อนไข q= 242 W/m^2 และ T_j=28.5°C)

สำหรับผลกระทบของระยะห่างระหว่างเจ็ท (S/D) ต่อการถ่ายเทความร้อนบนผนัง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทต่ำ (S/D=1) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอทุกระยะพุ่งชน และเมื่อระยะห่างระหว่างเจ็ทเพิ่มขึ้น (S/D=2, 3, 4, 5) จะปรากฏบริเวณที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงเป็นบริเวณกว้างขึ้น (บริเวณสีเขียว) โดยเฉพาะบริเวณมุมที่เป็นรอยต่อระหว่างเจ็ท (ที่ล้อมรอบด้วยเจ็ททั้งสี่ลำ) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด (บริเวณสีเขียวน้ำเงิน) จะสังเกตได้ชัดเจนในกรณีที่ S/D=5, L/D=2 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มมากขึ้นการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้จะดีขึ้นเล็กน้อย

สำหรับผลกระทบของระยะพุ่งชน (L/D) ต่อการถ่ายเทความร้อนบนผนัง พบว่ามีน้อยกว่าผลของระยะห่างระหว่างเจ็ท (S/D) โดยเฉพาะที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน L/D>6 เนื่องจากการไหลของเจ็ทตรงกลางบนผนังถูกจำกัดการไหลจากเจ็ทผนังของเจ็ทที่ล้อมรอบอยู่ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังไม่แตกต่างกันมากนัก รูปที่ 6 แสดงการกระจายของค่า Nusselt Number Nu บนแกน X/D ที่ผ่านตำแหน่ง Y/D=0 สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างเจ็ทและระยะพุ่งชนต่างๆ

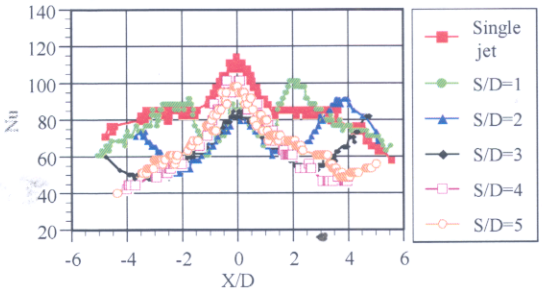
ที่ระยะพุ่งชน L/D=2 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu ของกรณีระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1 ค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ เนื่องจากระยะห่างระหว่างเจ็ทน้อย ส่วนที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=2 ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางจะต่ำกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยวมาก เนื่องจากการผสมกันระหว่างเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ค่า Nu ของเจ็ทลำตรงกลางจะลดลงตามระยะห่างจากตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชน หลังจากนั้นค่า Nu จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากการพุ่งชนของเจ็ทที่อยู่ติดกัน แต่เนื่องจากอิทธิพลของเจ็ทลำตรงกลางทำให้ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่อยู่ติดกันถูกพัดพาให้ไกลออกไปจากตำแหน่งท่อเจ็ทที่ X/D= ± 2 และจากรูปพบว่า ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่อยู่รอบๆ จะมีค่าสูงกว่าค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่อยู่ตรงกลาง และที่ S/D=3, 4 ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางจะเพิ่มขึ้นและการเปลี่ยนแปลงค่า Nu จะลดลงคล้ายกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว เนื่องจากระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเพิ่มขึ้นทำให้อิทธิพลจากเจ็ทลำที่อยู่ติดกันลดลง และสามารถสังเกตค่า Nu สูงสุดอันดับที่สองของเจ็ทลำตรงกลางที่ตำแหน่ง X/D= ± 2 ได้

ในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=4 ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำกลางจะมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับทุกระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D แต่ค่าจะต่ำกว่ากรณีของเจ็ทแบบเดี่ยว และที่ระยะ S/D=1 การเปลี่ยนแปลงค่า Nu จะลดลงจากค่าสูงสุดที่ X/D=0 อย่างรวดเร็ว เนื่องจากอิทธิพลของเจ็ทผนังจากลำเจ็ทที่อยู่ติดกัน ส่วนที่ระยะ S/D= 3, 4, 5 การเปลี่ยนแปลงของค่า Nu ในช่วง -2<X/D<2 จะคล้ายคลึงกับเจ็ทเดี่ยว ส่วนที่ระยะ S/D=3 จะสังเกตได้เช่นกันว่า ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางต่ำกว่าของเจ็ทที่อยู่ติดกัน

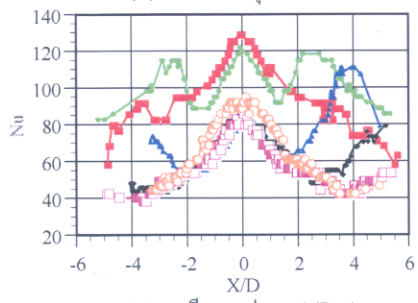
ในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=6 ที่ระยะ S/D=1, 2, 3 พบว่าค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าต่ำกว่าค่าของกรณีเจ็ทเดี่ยวมาก นอกจากนี้ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าต่ำกว่าของเจ็ทที่อยู่ติดกันด้วย และที่ระยะ S/D=4, 5 พบว่าค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าสูงขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงค่า Nu จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว

ในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=8 ที่ระยะ S/D=1 ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทแต่ละลำมีค่าใกล้เคียงกับค่า Nu สูงสุดของกรณีเจ็ทเดี่ยว ซึ่งแตกต่างจากผลของกรณีระยะพุ่งชน L/D=2, 4, 6 คาดว่าอาจเกิดจากระหว่างที่เจ็ทขยายตัวและการรวมตัวของเจ็ทที่อยู่ติดกันก่อนพุ่งชนผนัง ส่วนที่ระยะ S/D=2, 3 ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำตรงกลางมีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่ากรณีของเจ็ทเดี่ยวมาก แต่ค่า Nu สูงสุดของเจ็ทลำที่ติดกันของกรณี S/D=2 มีค่าสูงกว่าของเจ็ทลำตรงกลางมาก และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเจ็ทเป็น S/D=5 พบว่าค่า Nu ของเจ็ทลำตรงกลางจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และสำหรับกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=10

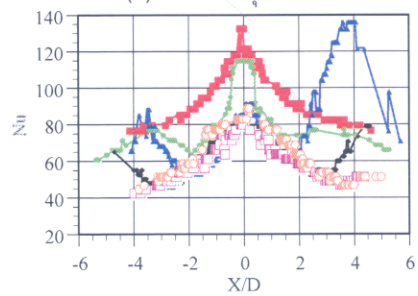
การกระจายของค่า Nu จะมีแนวโน้มคล้ายกับกรณีระยะพุ่งชน L/D=8 แต่ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1 ค่า Nu สูงสุดของลำเจ็ทที่อยู่ติดกันจะน้อยกว่าของลำเจ็ทที่อยู่ตรงกลางมาก ซึ่งอาจเกิดจากเจ็ทที่อยู่รอบข้างรวมตัวกับเจ็ทที่อยู่ตรงกลาง



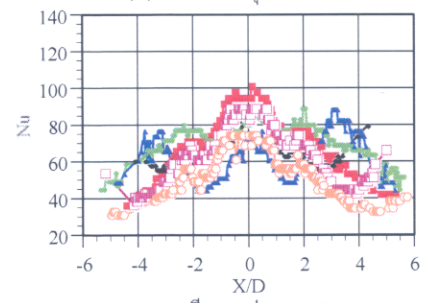
(ก) กรณีระยะพุ่งชน L/D=2



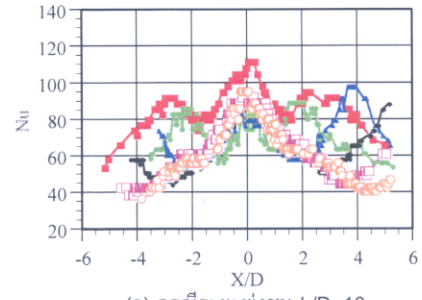
(ข) กรณีระยะพุ่งชน L/D=4



(ค) กรณีระยะพุ่งชน L/D=6



(ง) กรณีระยะพุ่งชน L/D=8

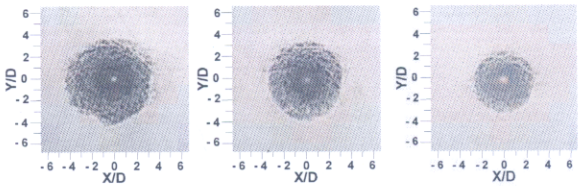


(จ) กรณีระยะพุ่งชน L/D=10

รูปที่ 6 การกระจายของค่า Nu บนแกน X/D ผ่านตำแหน่ง Y/D=0

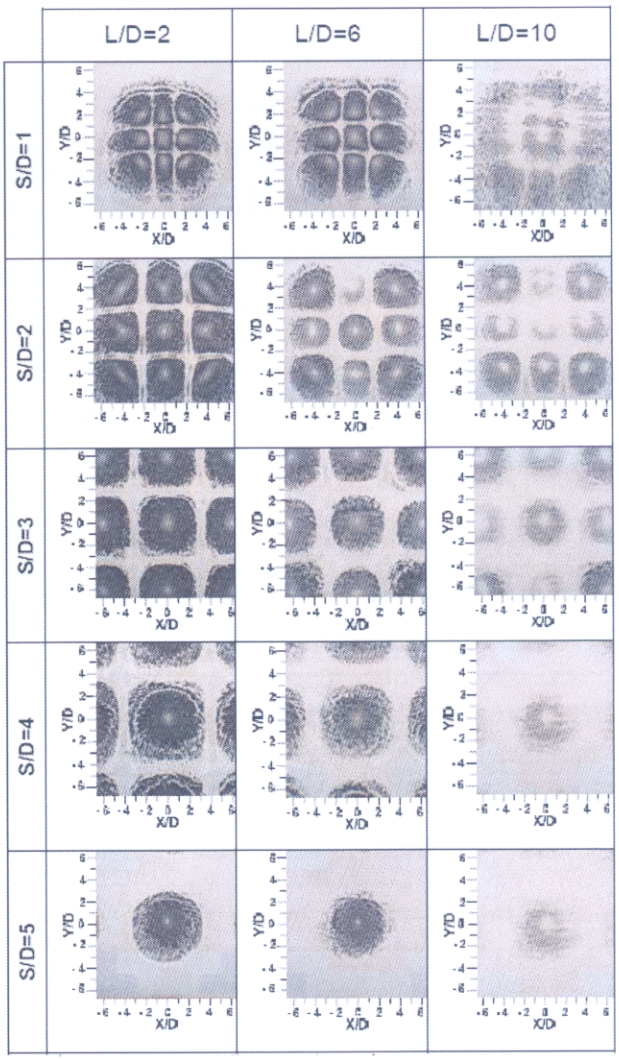
3.2 ผลจากการศึกษาการไหลบนผนังด้วยวิธี ฟิล์มน้ำมัน

รูปที่ 7 แสดงผลการทดลองกรณีของเจ็ทเดี่ยวที่ระยะพุ่งชน L/D=2, 6 และ 10 ในรูปแสดงภาพถ่ายฟิล์มน้ำมันที่เวลา 600 s หลังเจ็ทเริ่มพุ่งชน



(a) L/D=2 (b) L/D=6 (c) L/D=10

รูปที่ 7 ภาพฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทเดี่ยวที่ระยะพุ่งชน



รูปที่ 8 แสดงภาพฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลา 600 s หลังเจ็ทพุ่งชน

จากผลการศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนัง บริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิล์มน้ำมัน และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปหมด ภาพถ่ายของฟิล์มน้ำมันจะสามารถสังเกตการไหลของบริเวณต่างๆ บนพื้นผิวได้ จุดที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะสังเกตได้ว่ามีฟิล์มน้ำมันเกาะติดอยู่ (บริเวณสีขาวกลางภาพ)

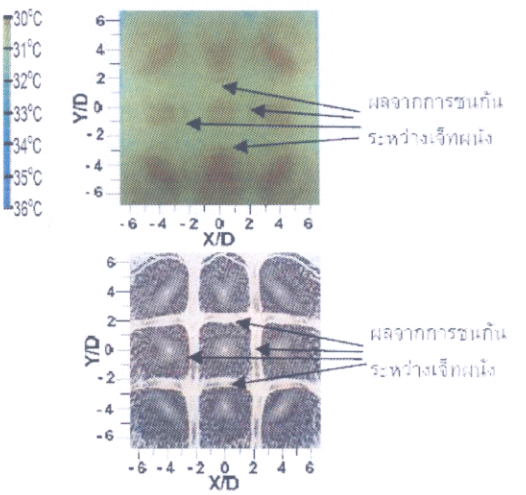
เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความเร็วเจ็ทบนผนังเท่ากับศูนย์ ส่วนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) จะเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปรอบ ๆ จากจุดที่เจ็ทพุ่งชน (บริเวณที่เห็นเป็นผนังสีดำไม่มีน้ำมันเกาะติด) เนื่องจากการไหลบนผนังมีความเร่งเกิดขึ้นและมีความเค้นเฉือนบนผนังที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนผนัง ในบริเวณนี้ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำ)

รูปที่ 8 แสดงผลการทดลองด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน ที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน L/D และระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่าง ๆ แต่ละภาพจะเป็นภาพของฟิล์มน้ำมันที่เวลา 600 s หลังจากเจ็ทเริ่มพุ่งชน ในภาพบริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิล์มน้ำมัน และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกหมด

จากผลการทดลองพบว่าลักษณะของฟิล์มน้ำมันสอดคล้องกับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนัง สามารถเห็นบริเวณของจุดพุ่งชน บริเวณเจ็ทพุ่งชนและบริเวณของเจ็ทผนังของเจ็ทแต่ละลำได้ชัดเจน ในกรณีที่ S/D=2 และ L/D=2 บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส หรือในกรณีที่ S/D=4 และ L/D<4 จะสามารถสังเกตเห็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนมีลักษณะเป็นวงกลม แต่บริเวณของเจ็ทผนังจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส เนื่องจากการไหลของเจ็ทตรงกลางถูกจำกัดโดยเจ็ทที่ล้อมรอบ และบริเวณสีขาวทึบจะเป็นบริเวณที่น้ำมันสะสมอยู่ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนต่ำ คาดว่าเกิดจากการชนกันของเจ็ทบนผนังและเกิดการไหลออกจากผนังที่เจ็ทพุ่งชน (Upward flow)

นอกจากนี้เจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะมีผลต่อคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่รอบ ๆ เจ็ทตรงกลางด้วย สังเกตได้จากกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=2-6 และระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1-2 เจ็ทที่อยู่รอบ ๆ ได้รับอิทธิพลจากการไหลของเจ็ทที่อยู่ตรงกลาง เป็นผลทำให้การถ่ายเทความร้อนมีลักษณะแตกต่างจากกรณีของเจ็ทแบบเดี่ยว

รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทรอบ ๆ เจ็ทตรงกลางที่เงื่อนไข L/D=2 และ S/D=2 จากรูปสามารถสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทรอบ ๆ และผลของการชนกันระหว่างเจ็ทบนผนังได้จากเส้นสีแดงระหว่างบริเวณพุ่งชนของเจ็ทที่อยู่ติดกันเป็นบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D มากขึ้น อิทธิพลจากเจ็ทที่อยู่ติดกันจะลดลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแต่ละลำมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีของเจ็ทเดี่ยวมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับทุกกรณี เจ็ทที่อยู่รอบ ๆจะถูกการไหลจากเจ็ทที่อยู่ตรงกลางพัดพาออกไปทำให้จุดที่เจ็ทพุ่งชนไม่ตรงกับจุดตำแหน่งของปากทางออกเจ็ท รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างลักษณะการไหลของเจ็ทบนผนัง จากรูปการไหลของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะถูกจำกัดโดยการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบ และการไหลของเจ็ทตรงกลางจะมีอิทธิพลต่อการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบ ทำให้มีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณีของเจ็ทเดี่ยว และจากรูปจะสามารถสังเกตเห็นบริเวณที่น้ำมันสะสม (บริเวณสีขาวทึบระหว่างการไหลของเจ็ทที่อยู่ติดกัน) เกิดจากการไหลออกจากผนัง (Upward flow) และระหว่างเส้นทึบขาวนี้จะมีบริเวณที่น้ำมันลอกออกจากผิวเป็นเส้นขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 9 แสดงการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทบนผนังที่เงื่อนไข L/D=2 และ S/D=2 ที่เวลา 600 s

4 สรุปผลการทดลอง

(1) ในกรณีที่ใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนบนผนัง การถ่ายเทความร้อนจะสูงในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนรอบ ๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D และระยะพุ่งชน L/D

(2) กรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D ต่ำ เจ็ทลำตรงกลางจะถูกจำกัดการขยายตัวทั้งก่อนและหลังการพุ่งชนบนผนังจากเจ็ทที่ล้อมรอบ ซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังต่ำลงกว่ากรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบเดี่ยวมาก และหากระยะ S/D เพิ่มมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำตรงกลางจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอิทธพลของเจ็ทลำที่อยู่ติดกันน้อยลง

(3) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสม่ำเสมอมากที่สุดในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=2 และระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1 และในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=8 และระยะห่างระหว่างเจ็ท S/D=1 จะให้การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดของเจ็ทที่เรียงติดกันจะมีค่าสูงใกล้เคียงกับกรณีของเจ็ทเดี่ยว

เอกสารอ้างอิง

[1] Jung-Yang SAN, Mao De LAI, Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets, 44, 2001, pp.3997-4007

[2] Jung-Yang SAN, Yi-Ming TSOU, Zheng-Chieh CHEN, Impingement heat transfer of staggered arrays of air jets confined a channel, 50, 2007, pp.3718-3727

[3] BARATA, J. M. M., Fountain flows produced by multiple impinging jets in cross flow, 34, 12, pp.2523 -2530.

[4] P. BREVET, C. DEJEU, E. DORIGNAC, M. JOLLY, J.J. VULLIERME, Heat transfer to a row of impinging jets in consideration of optimization, 45, 2002, pp. 4191- 4200

ภาคผนวก ฌ3

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, วันที่ 13-14 มีนาคม 2551 โรงแรมยูเรเซีย จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ

HEAT TRANSFER AND FLOW CHARACTERISTICS OF SWIRLING JET IMPINGING ON A FLAT SURFACE

มักตาร์ แวหะยี
ชยุต นันทดุสิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

อศิ บุญจิตราดุลย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จ.กรุงเทพมหานคร 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยที่เจ็ทหมุนควงถูกสร้างโดยการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท และระดับการหมุนควงของเจ็ทจะขึ้นอยู่กับระยะพิตช์ของเกลียวแผ่นบิด สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยค่า Swirl number Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 และระยะพุ่งชน L/D=2, 4, 6, 8, และ 10 โดยจะกำหนดค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ที่ Re=30,000 ทุกกรณี เพื่อทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว สำหรับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวได้ศึกษาการกระจายอุณหภูมิโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) และการศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้ใช้วิธีเชิงทัศน์เทคนิคฟิล์มน้ำมัน จากผลการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงขึ้นและขยายเป็นบริเวณกว้างในกรณีที่ Sw=0.40 เมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทแบบไม่หมุนควง แต่การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงเมื่อเพิ่ม Sw มากกว่า 0.40 และลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง จะปรากฏบริเวณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้น 2 บริเวณห่างออกจากจุดเจ็ทพุ่งชน

1. บทนำ

การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง และเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือ ให้อัตราส่วนระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนต่อมวลของไหลที่สูง ดังนั้นจึงสามารถประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น แต่บริเวณรอบๆ การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนังจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเจ็ทอิสระก่อนพุ่งชนผนังและระยะพุ่งชนของเจ็ท

ในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดที่จะเพิ่มอัตราการพาความร้อนและปรับปรุงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อธรรมดา เจ็ทหมุนควงเป็นเจ็ทที่ของไหลเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีด ที่มีทั้งความเร็วตามแนวแกนและความเร็วแนวสัมผัส ซึ่งวิธีการสร้างเจ็ทหมุนควงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การติดปีกบังคับทิศทางการไหลที่ปากทางออกท่อ หรือการหมุนผนังของท่อเจ็ท ในแต่ละวิธีจะมีโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่แตกต่างกัน โครงสร้างการไหลของเจ็ทเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยเฉพาะในกรณีที่ปากทางออกเจ็ทเป็นการไหลแบบหมุนควงแล้ว ระดับความหมุนควงของเจ็ทจะมีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท เนื่องจากเจ็ทหมุนควงจะเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบๆ เจ็ท ทำให้เจ็ทมีอัตราการขยายตัวที่สูง และการหมุนควงของเจ็ทจะมีผลทำให้ระดับความแปรปรวนในเจ็ทเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดา นอกจากนี้ เจ็ทหมุนควงมีคุณลักษณะบางอย่างที่แตกต่างจากการไหลแบบเจ็ทธรรมดาบางประการ เช่น เจ็ทธรรมดามีกลไกการกระจายตัวของเจ็ท ซึ่งเกิดจากการผสมกันที่ขอบของเจ็ทและของไหลรอบๆ แต่สำหรับเจ็ทหมุนควงนั้น การหมุนควงทำให้เกิด Pressure gradient ตามแนวแกนและแนวรัศมีของเจ็ท จึงทำให้การกระจายตัวของเจ็ทเกิดจาก Pressure gradient ด้วย นอกจากนั้นจะไม่พบส่วนของ Potential core (บริเวณที่ความเร็วของเจ็ทเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด) ภายในโครงสร้างของเจ็ทหมุนควง

Huang และ El-Genk [1] ได้ออกแบบอุปกรณ์สร้างเจ็ทหมุนควงสำหรับสอดในท่อเจ็ท โดยอุปกรณ์มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตันคว้านให้เป็นร่อง 4 ร่อง ทำมุมกับแกนของเจ็ท ในการทดลองมุมบิดที่ใช้สร้างเจ็ทหมุนควงจะอยู่ที่ 15°, 30° และ 45° จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวพบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อน

บนผนังได้ค่อนข้างมาก และช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้เมื่อเทียบกับเจ็ทแบบธรรมดา และเงื่อนไขที่ให้การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด คือกรณีที่มุมบิดเท่ากับ 15 องศา และระยะพุ่งชน L/D=2

Alekseenko และคณะ [2] ได้ทำการทดลองเจ็ทพุ่งชนผนังโดยมุ่งศึกษาผลกระทบของค่า Swirl number ของเจ็ทที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดที่ติดตัวสร้างกระแสหมุนควง ซึ่งมีลักษณะเป็นใบบังคับทิศทางที่สามารถปรับค่า Swirl number โดยการปรับมุมเอียงของใบพัด ในการทดลองใช้ค่า Swirl number ตั้งแต่ 0.0 - 1.0 และกำหนดระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวพุ่งชนที่ระยะ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ซึ่งผลการศึกษาพบว่า อัตราการหมุนควงของเจ็ทที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการแพร่กระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตามในการทดลองไม่ได้มุ่งเน้นไปที่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนแผ่นระนาบที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะศึกษาลักษณะการกระจายของความเร็วเจ็ท

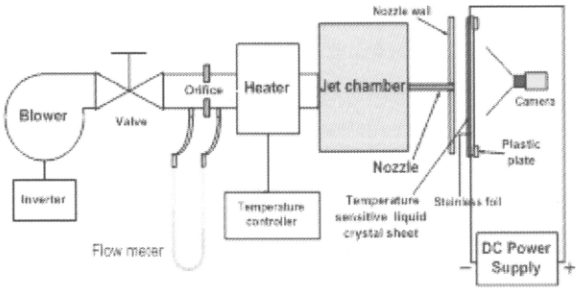
Bakirci และ Bilen [3] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเดี่ยวแบบหมุนควง ที่พุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในการทดลองใช้หัวฉีดที่เป็นท่อธรรมดาและติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนควงแบบ Helical four channel และบิดให้เป็นเกลียวทำมุมกับแนวแกนของท่อเจ็ทดังนี้ θ = 0°, 22.5°, 41° , 50° และทำการศึกษาที่ระยะพุ่งชน L/D = 6 – 14 สำหรับผลการทดลองที่มุมบิด θ = 50° ค่า Nusselt number สูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่จุด Stagnation point แต่จะเกิด Nusselt number สูงสุด บริเวณรอบๆ แทนถึง 4 จุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากตัวสร้างกระแสหมุนวนที่ออกแบบมาให้มีร่อง 4 ช่อง ส่วนกรณีที่มุมบิด θ = 22.5° การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมรอบบริเวณพุ่งชน

ในงานวิจัยนี้จะใช้เจ็ทหมุนควงที่สร้างจากการสอดแผ่นบิด (Twisted tape) ภายในท่อเจ็ท สาเหตุที่เลือกใช้วิธีนี้ เพราะว่าการใช้แผ่นบิดเพื่อสร้างเจ็ทหมุนควงนั้นง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่มีการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์สร้างกระแสหมุนควง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ซึ่งระยะพิตช์ของเกลียวแผ่นบิดหรือจำนวนรอบที่บิดต่อความยาวแผ่นบิด จะมีผลต่อระดับความหมุนควงของเจ็ท งานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีต ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยการวัดการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิวโดยใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิล ทำให้ไม่สามารถวัดการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิวได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) เพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากสามารถวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ทุกจุด สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ระยะพุ่งชน L/D=2, 4, 6, 8, 10 และ Swirl number Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 โดยที่จะกำหนดค่าเรย์โนลด์ให้คงที่ Re= 30,000 เพื่อทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

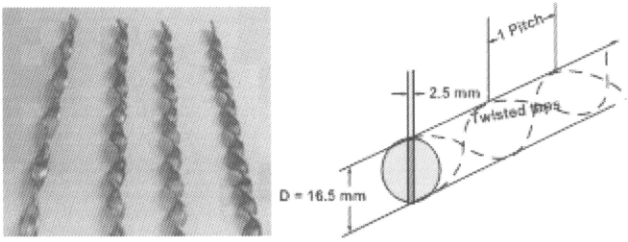
รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบรเวอร์ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดด้วยอินเวอเตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และจะผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าห้องกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังด้านของท่อเจ็ทไว้ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน ชุดทดลองนี้สามารถปรับระยะพุ่งชนระหว่างปากทางออกเจ็ทและพื้นผิวพุ่งชนได้ ในการทดลองนี้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ท Re= 30,000 ได้คำนวณจากความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่หาจากอัตราการไหลของเจ็ท ดังนั้นสำหรับทุกกรณีของ Swirl number จะมีอัตราการไหลเท่ากัน



รูปที่ 1 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

2.2 ตัวกำเนิดกระแสหมุนควง

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะของแผ่นบิดที่สอดในท่อเจ็ท แผ่นบิดนี้ทำจากแผ่นสเตนเลสแบนมีความหนา 2.5 mm ขนาดความกว้างประมาณ 16.5 mm มีขนาดความยาว 300 mm สอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิดสอดในลักษณะเสมอกับปากทางออกของท่อเจ็ท และสันของแผ่นบิดที่ตำแหน่งปลายท่อเจ็ทจะอยู่ในตำแหน่งแนวดิ่งดังแสดงในรูปที่ 2 ทุกการทดลอง



รูปที่ 2 ตัวอย่างของแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท

ในงานวิจัยนี้ระดับความหมุนควงของเจ็ทจะนิยามโดยใช้ค่า Swirl Number (Sw) ซึ่งมีนิยามคือ

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \qquad (1)$$

ในที่นี้ G_θ คือฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ทของโมเมนตัมเชิงมุม, G_n คือ

ฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ทของโมเมนตัมเชิงเส้นและ R คือรัศมีท่อ โดยที่ค่าฟลักซ์ในแต่ละเทอมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทได้ดังนี้ คือ

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \quad (2)$$

$$G_\theta = 2\pi \int_0^R \rho V_n V_\theta r^2 dr = \frac{\pi \rho V_n \omega R^4}{2} \quad (3)$$

เมื่อ V_n คือความเร็วในแนวแกนของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, V_θ คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, ρ คือความหนาแน่นของเจ็ท ในที่นี้หากสมมุติให้ V_n มีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี และให้ $V_\theta = \omega r$ โดยที่ ω คือความเร็วเชิงมุม

ในกรณีที่ใช้แผ่นบิดสอดในท่อเจ็ท ความเร็วเชิงมุมของเจ็ทจะคำนวณได้จากจำนวนพิตช์ (n) และความยาวแผ่นบิด (l) ดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \quad (4)$$

จากสมการทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ของค่า Swirl Number ดังนี้

$$Sw = \frac{\pi n R}{l} \quad (5)$$

ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์นี้พบว่า ค่า Swirl Number นี้ไม่ขึ้นกับความเร็วของเจ็ท แต่อย่างไรก็ตามสมการความสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้นนี้ได้มาจากสมมุติฐานของกรณีที่สมมุติให้ความเร็วในแกนของเจ็ท และความเร็วเชิงมุมของเจ็ทคงที่ตลอดทางออกของท่อเจ็ท ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว จะเกิดชั้นขอบเขตการไหลบริเวณใกล้ผนังท่อเจ็ท ทำให้ความเร็วในแกนของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งรัศมีของท่อเจ็ท ดังนั้นค่า Swirl Number ที่ได้จากสมการข้างต้นเป็นค่าประมาณทางทฤษฎีเท่านั้น สำหรับค่า Swirl Number จริงนั้นสามารถหาได้จากการทดลองวัดการกระจายความเร็วในแนวแกนของเจ็ท และความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ ที่ปากทางออกของท่อเจ็ท ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแผ่นบิดทั้งหมดที่สร้างขึ้นและค่าประมาณทางทฤษฎีของ Swirl Number ของแผ่นบิดแต่ละแบบ

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนพิตช์ต่อความยาวและค่า Swirl number

Number of pitch (l=300mm)	Swirl number
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

2.3 วิธีการศึกษาการกระจายตัวของเจ็ทหมุนควงแบบอิสระ

ในเบื้องต้นจะทำการศึกษาการกระจายของเจ็ทโดยวิธีเชิงทัศน์เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของเจ็ทกรณีใช้แผ่นบิดที่มีจำนวนพิตช์ต่อความยาวต่างๆ โดยการทดลองจะใช้น้ำเป็นของไหลในการศึกษาแทนอากาศ ชุดทดลองประกอบไปด้วยตู้กระจกใสสำหรับศึกษาการกระจายของเจ็ทน้ำที่ปล่อยออกจากท่อเจ็ท ถังเก็บเจ็ทน้ำ ปั๊มน้ำขนาดเล็ก เครื่องวัดอัตราการไหลแบบลูกลอย วาล์วปรับอัตราการไหล และท่อเจ็ทที่สามารถสอดแผ่นบิดแบบต่างๆ ในส่วนของเจ็ทน้ำจะใช้สารละลาย Phenolphthalein (ซึ่งเป็นสาร pH indicator ในช่วง pH มากกว่า 8 จะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีบานเย็นเข้ม และเมื่อ pH น้อยกว่า 8 จะเปลี่ยนเป็นสารละลายไม่มีสี) มาผสมกับสารละลาย NaOH เพื่อให้เปลี่ยนเป็นสีบานเย็นเข้ม และใช้เป็นตัวบอกเส้นทางการไหลของเจ็ท หลังจากฉีดเจ็ทลงไปในถังน้ำแล้ว เจ็ทของงสารละลายจะผสมกับน้ำรอบๆ ทำให้ pH ของสารละลายต่ำลงจน pH น้อยกว่า 8 แล้วสีบานเย็นของเจ็ทจะเจือจางลงจนเปลี่ยนเป็นไม่มีสีอีกครั้ง

2.4 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนัง

ในการทดลองนี้จะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm เป็นผนังสำหรับเจ็ทพุ่งชน แผ่นสเตนเลสนี้จะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะรูเป็นหน้าต่างขนาด 220 mm x 220 mm ไว้กลางแผ่น และใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสไว้ทั้งสองข้าง ซึ่งแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q_{input} = \frac{I^2 R}{A} \quad (6)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดบนด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 35°C ถึง 40°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC

ในการทดลองนี้จะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่ร้อนเพื่อระบายความร้อน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q_{input}}{T_{LC} - T_j} \quad (7)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทในห้องกักอากาศ และค่า Nusselt Number บนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (8)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

ในการทดลองนี้ เส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC จะหมายถึงเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิที่คงที่ และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (7) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากันด้วย

แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ เพื่อให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลให้คงเดิม แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า

หรืออัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่งและหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จึงบันทึกภาพแผ่น TLC โดยกล้องดิจิตอล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีก จนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้

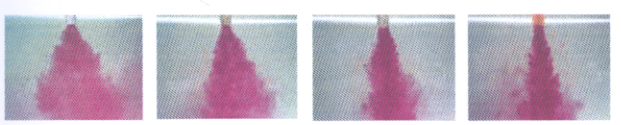
2.5 วิธีการศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนังโดยใช้วิธีฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique)

ในการทดลองนี้จะศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) และจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชนแทนแผ่นสเตนเลส อีกทั้งบนพื้นผิวด้านที่เจ็ทพุ่งชนจะทาน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของ Paraffin แบบเหลว ผง Titanium dioxide และกรด Oleic บางๆ ทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจะให้เจ็ทพุ่งชนผิวน้ำมัน และบันทึกการไหลของชั้นน้ำมันบนพื้นผิวจากด้านหลังของผนังใส โดยใช้กล้องดิจิตอลบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างๆ

3. ผลการทดลอง

3.1 การกระจายตัวของเจ็ทหมุนควงแบบอิสระ

รูปที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของ Swirl number ที่มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ทอิสระกรณีที่ไม่มีผนังเจ็ทติดตั้งอยู่ จากรูปเห็นได้ชัดว่าการกระจายตัวของเจ็ทจะเพิ่มขึ้นตามค่า Swirl number ที่เพิ่มขึ้น และในกรณีที่เจ็ทหมุนควงมีค่า Swirl number สูงจะเกิดปรากฏการณ์ Vortex breakdown ขึ้นในลำเจ็ท ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าระหว่างการทดลอง



(a) Sw=0.78 (b) Sw=0.62 (c) Sw=0.4 (d) Sw=0.0

รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของ Swirl number ที่มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท: 16.5 mm, อัตราการไหลของเจ็ทน้ำ: 1.13 l/min, Re=1500)

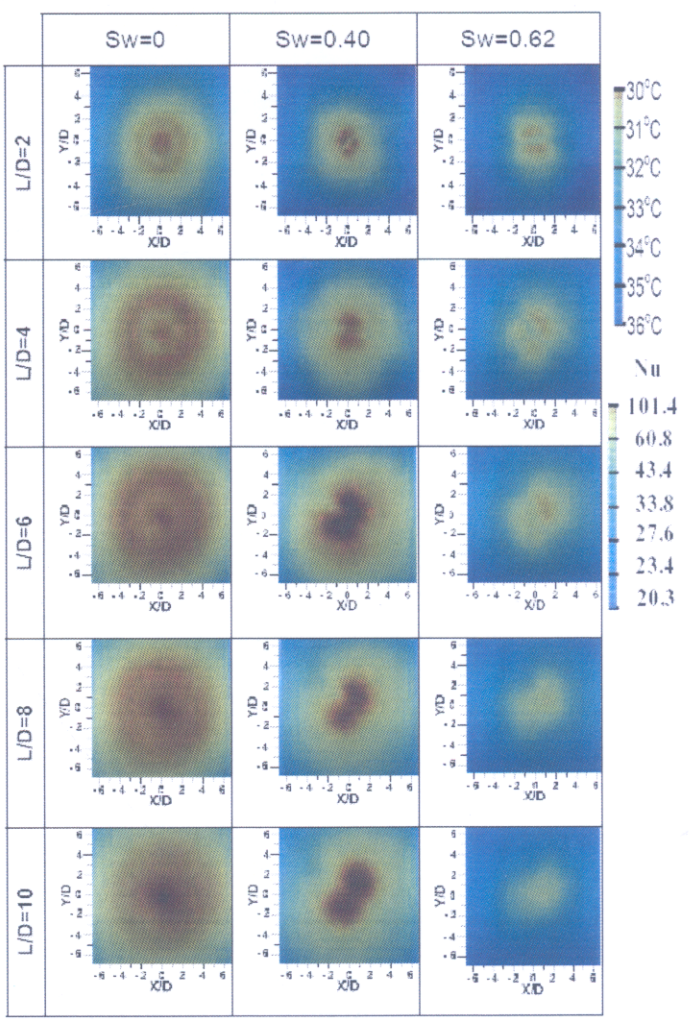
3.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองกรณีเปลี่ยนแปลงระยะพุ่งชน L/D=2-10 ที่ค่า Sw=0, 0.4 และ 0.62 ในรูปแสดงภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่เงื่อนไข q= 242 W/m^2, T_j=28.5°C และ Re=30,000 สำหรับสีบนแผ่น TLC จะแสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะมีอุณหภูมิต่ำและมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูง ส่วนบริเวณห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน อุณหภูมิจะสูงขึ้นและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงตามลำดับ

สำหรับกรณีของเจ็ทแบบไม่หมุนควง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเจ็ทพุ่งชน (X/D=0, Y/D=0) หลังจากนั้นค่าจะลดลงตามระยะที่ห่างจากจุดเจ็ทพุ่ง แต่ในกรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=2, 4, 6 จะเกิดบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดอันดับที่สองรอบจุดเจ็ทพุ่งชน โดยเกิดขึ้นที่ตำแหน่งห่างจากจุดเจ็ทพุ่งชนประมาณ 2D ถึง 3D และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดที่จุดเจ็ทพุ่งชนจะสูงขึ้นตามระยะพุ่งชนที่เพิ่มขึ้น

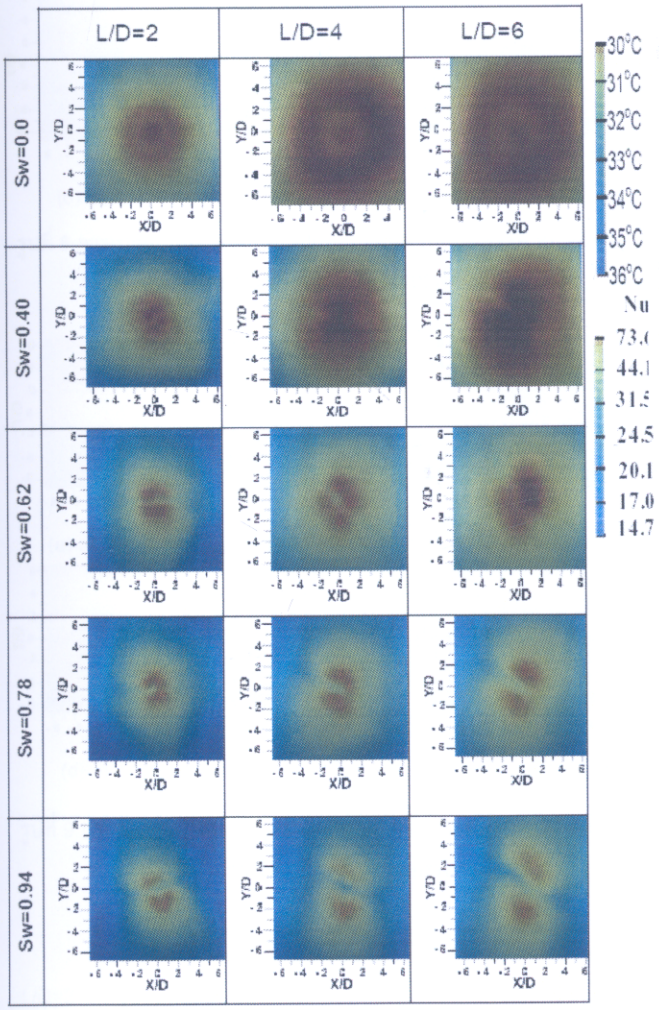
สำหรับกรณีของเจ็ทหมุนควงที่ Sw=0.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งรอบๆ จุดเจ็ทพุ่งชน จากภาพสามารถเห็นเป็น 2 บริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงรอบจุดเจ็ทพุ่งชน (X/D=0,Y/D=0) เนื่องจากเจ็ทออกจากท่อที่สอดแผ่นบิดอยู่ ทำให้การไหลในท่อเจ็ทแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและเมื่อพุ่งชนผนังจึงเกิดบริเวณทั้งสองนี้ขึ้น และบริเวณที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามรอบๆ บริเวณนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทแบบไม่หมุนควง

ในกรณีที่ระดับการหมุนควงของเจ็ทสูงขึ้นเป็น Sw=0.62 จะพบว่าบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงทั้งสองนี้ มีระยะห่างจากจุดเจ็ทพุ่งชน (X/D=0,Y/D=0) มากขึ้น ซึ่งเกิดจากระดับการหมุนควงของเจ็ทเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของ Sw=0.40 แต่เมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้นจาก L/D=2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของทั้งสองบริเวณนี้จะลดลงและหายไปที่ระยะพุ่งชน L/D=10



รูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน L/D ต่างๆ (q= 242 W/m^2, T_j=28.5°C, Re=30,000)

รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ค่า Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 สำหรับระยะพุ่งชน L/D=2, 4, 6 ในรูปแสดงภาพถ่ายของแผ่น TLC ที่เงื่อนไข q= 176 W/m^2, T_j=28.5°C และ Re=30,000 จากรูปพบว่า ในกรณีของเจ็ทหมุนควงจะเกิดบริเวณที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงขึ้น 2 บริเวณรอบจุดที่เจ็ทพุ่งชน และระยะห่างระหว่าง 2 บริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพุ่งชน L/D เพิ่มขึ้นหรือกรณีที่ Swirl number เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนังในบริเวณรอบๆ ได้รับอิทธิพลจากการหมุนควงของเจ็ทด้วย ทำให้การถ่ายเทความร้อนแตกต่างจากกรณีของเจ็ทแบบไม่หมุนควง

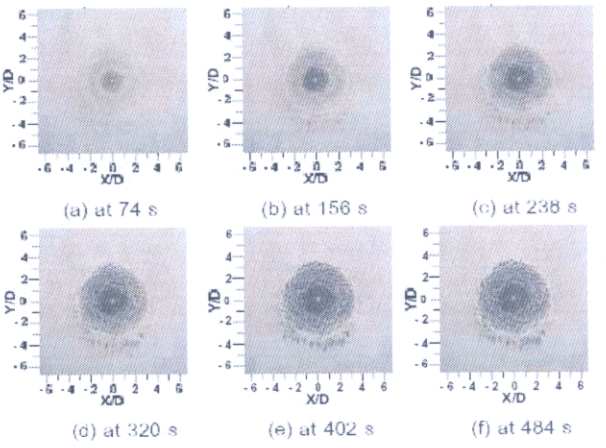


รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ค่า Swirl number ต่างๆ (q= 176 W/m^2, T_j=28.5°C, Re=30,000)

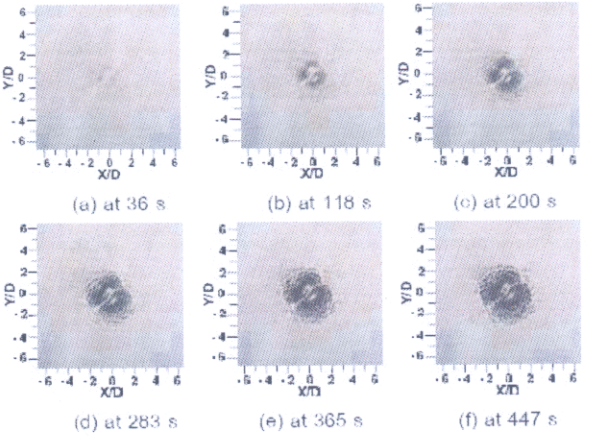
หากเปรียบเทียบกันกับกรณีเจ็ทไม่หมุนควงแล้ว กรณีเจ็ทหมุนควงมีค่า Sw= 0.40 การถ่ายเทความร้อนรอบจุดเจ็ทพุ่งชนจะเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะเมื่อเพิ่มระยะพุ่งชน L/D บริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงจะขยายกว้างขึ้น แต่กรณีที่เพิ่มค่า Swirl number เป็น Sw=0.62, 0.78 และ 0.94 การถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนกลับต่ำกว่าเจ็ทแบบไม่หมุนควง Sw= 0.0 มาก เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทในแนวแกนที่พุ่งชนผนังลดลง และโมเมนตัมของเจ็ทในทิศทางการหมุนควงเพิ่มขึ้น เมื่อ Swirl number เพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังลดลง

3.3 พฤติกรรมการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว

รูปที่ 6 ถึงรูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทเริ่มพุ่งชนผนังที่ระยะพุ่งชน L/D=2 สำหรับกรณี Sw=0.0, 0.40, 0.62 และ 0.78 ในแต่ละภาพบริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นฟิล์มน้ำมัน และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปหมด



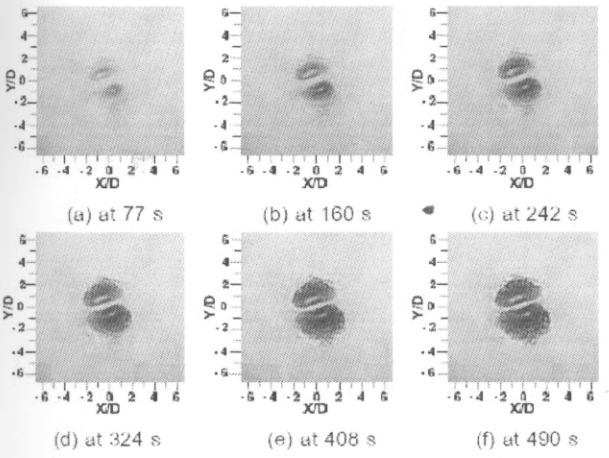
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวของกรณีที่ Sw = 0.0, ระยะพุ่งชน L/D=2



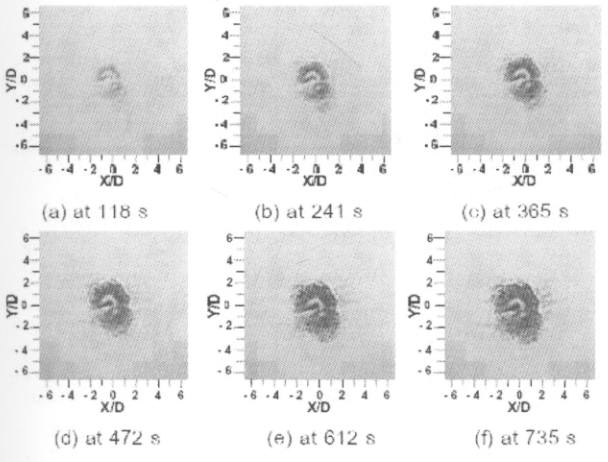
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวของกรณีที่ Sw = 0.40, ระยะพุ่งชน L/D=2

จากภาพถ่ายของฟิล์มน้ำมันจะสามารถสังเกตการไหลบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ ได้ ซึ่งจุดที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะสังเกตได้ว่ามีฟิล์มน้ำมันเกาะติดอยู่ (บริเวณสีขาวกลางภาพ) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความเร็วเจ็ทบนผนังเท่ากับศูนย์ ส่วนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) จะเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปรอบๆ จากจุดที่เจ็ทพุ่งชน (บริเวณที่เห็นเป็นผนังสีดำไม่

มีน้ำมันเกาะติด) เนื่องจากการไหลบนผนังมีความเร่งเกิดขึ้นและมีความเค้นเฉือนบนผนังที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนผนัง ในบริเวณนี้ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำ)



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวของกรณีที่ Sw = 0.62, ระยะพุ่งชน L/D=2



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ หลังเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวของกรณีที่ Sw = 0.78, ระยะพุ่งชน L/D=2

รูปที่ 6 แสดงภาพฟิล์มน้ำมันของกรณี Sw=0.0 ที่ระยะพุ่งชน L/D=2 จากรูปที่เวลา 74 s สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นจุดสีขาวของน้ำมันที่สะสมอยู่ได้หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปเจ็ทจะไหลออกในแนวรัศมีบนผนัง และจะสังเกตเห็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งและบริเวณของเจ็ทผนังได้ชัดเจน สำหรับกรณีของเจ็ทหมุนควง Sw=0.40, 0.62 และ 0.78 จากรูปที่เวลาเจ็ทเริ่มพุ่งชนพื้นผิวจะพบว่าเจ็ทที่ออกมาจากท่อเจ็ทจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แล้วพุ่งชนบนผนังปรากฏเป็นรอยน้ำมัน บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 2 บริเวณ เมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มน้ำมันจะขยายตัวออกไปในแนวรัศมีจากจุดพุ่งชน (X/D=0, Y/D=0) สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (บริเวณสีดำที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกจากผิว) และบริเวณที่น้ำมันสะสมอยู่ในทั้ง 2 บริเวณ และเมื่อเวลาผ่านไปจะสังเกตเห็นบริเวณของเจ็ทผนังที่น้ำมันถูกพัดออกไปบางส่วน (บริเวณสีขาวสลับสีดำ) จากผลการทดลองนี้พบว่าลักษณะของฟิล์มน้ำมันสอดคล้องกับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนัง กรณีที่ระยะพุ่งชน L/D=2 คือบริเวณที่น้ำมันสะสมอยู่ระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน 2 บริเวณ (บริเวณสีดำ) จะสอดคล้องกับบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูง 2 บริเวณ

4. สรุปผลการทดลอง

(1) การกระจายของเจ็ทหมุนควงอิสระจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่ม Swirl number ของเจ็ท เป็นผลจากความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการผสมกันกับของไหลที่อยู่รอบๆมากขึ้น

(2) ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิวจะปรากฏบริเวณที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดสองบริเวณห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนและระยะห่างระหว่างสองบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพุ่งชน L/D หรือ Swirl number ของเจ็ทเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกรณีของเจ็ทธรรมดาแบบไม่หมุนควงซึ่งจะมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงสุดที่จุดเจ็ทพุ่งชนเท่านั้น

(3) การใช้เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 พุ่งชนพื้นผิวจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่พุ่งชนได้มากกว่าการใช้เจ็ทธรรมดาแบบไม่หมุนควงเฉพาะในช่วงระยะพุ่งชน L/D=4-10 แต่หากเพิ่ม Swirl number ของเจ็ทหมุนควงเป็น Sw=0.62, 0.78 และ 0.94 อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงกว่ากรณีของเจ็ทธรรมดาแบบไม่หมุนควง เนื่องจากเมื่อเพิ่ม Swirl number มากขึ้นความเร็วหรือโมเมนตัมที่พุ่งชนผนังลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังลดลงตามไปด้วย

(4) พฤติกรรมการไหลบนผนังที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชนสอดคล้องกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนผนัง โดยเจ็ทหมุนควงจากท่อเจ็ทที่สอดแผ่นบิดจะไหลแยกเป็นสองส่วนแล้วไหลแบบหมุนควงพุ่งชนบนผนัง ทำให้เกิดบริเวณเจ็ทหมุนควงพุ่งชนสองบริเวณห่างจากกัน หลังจากนั้นเจ็ทผนังจะไหลออกในแนวรัศมีจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน

เอกสารอ้างอิง

[1] L. Huang, M.S. El-Genk, Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets,, 1998, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.41, pp. 583-600

[2] S.V. Alekseeko, A.V.Bilsky, V.M.Dulin, D.M.Markovich, Experimental study of an impinging jet with different swirl rates, 2007, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp.1340-1359

[3] K. Bakirci, K. Bilen, Visualization of heat transfer for impinging swirl flow, 2007, Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, pp. 182-191

ภาคผนวก ฌ4

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, วันที่ 15-17 ตุลาคม 2551 กรุงเทพฯ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, หน้า 384-389.

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงพุ่งชน

Heat Transfer Enhancement on Surface Using Array of Impinging Swirl Jets

มักตาร์ แวหะยี[1] ชยุต นันทตุสิต[1*] และอคิ บุญจิตราดุลย์[2]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทร 0-7428-7035 โทรสาร 0-7421-2893 *อีเมล์ E-mail: chayut@me.psu.ac.th
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของกลุ่มเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิว ในการทดลองนี้ได้ใช้เจ็ทที่เป็นหัวฉีดแบบท่อ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ ที่เรียงกันเป็น 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว และใช้แผ่นบิดที่มีระยะพิตช์ต่าง ๆสอดในท่อเจ็ทเพื่อกำเนิดกระแสหมุนควงของเจ็ท สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, และ 8D ระยะห่างระหว่างเจ็ท S= 2D, 4D, 6D, และ 8D ระดับของการหมุนควง (Swirl number) Sw=0.40, 0.62, 0.78, 0.94 และเจ็ทท่อเปล่า(ไม่ใส่แผ่นบิด) โดยกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ในแต่ละการทดลองเท่ากับ 25,000 (อัตราการไหลของอากาศเท่ากันทุกกรณี) สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นTemperature sensitive liquid crystal (TLC) วัดการกระจายอุณหภูมิและหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ นอกจากนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน จากการที่ได้ศึกษาพบว่าการใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่พุ่งชนได้โดยเฉพาะกรณีที่ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน L=2D และกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S=2D, 4D แต่ในกรณีที่ L>2D อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิวจะลดลงและมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบเมื่อเทียบกับกรณีของกลุ่มเจ็ทจากท่อเปล่า

Abstract

The flow and heat transfer characteristics of array of swirling impinging jets on a surface were investigated. The jet flows were produced by in-line arrangement of 3x3 pipe nozzles which have 16.5 mm in diameter and impinged normally to the surface. Some twisted tapes with different length of twisted pitch were inserted in the pipe nozzle to generate swirling jet flow with different swirl number. The experimental parameters were the distance from nozzle exit to impinged surface L=2D, 4D, 6D and 8D, jet-to-jet distance S=2D, 4D, 6D and 8D, swirl number Sw=0.40, 0.62, 0.78, 0.94 and conventional pipe nozzle at constant jet Reynolds number of 25,000 (mass flow rate was constant). The distributions of temperature and convective heat transfer coefficient on impinged surface were measured using temperature sensitive liquid crystal (TLC) sheet with image processing technique. Flow patterns on an impinged surface were visualized using Oil film technique. The experimental results show that swirling impinging jets can increase heat transfer rate on impinged surface in cases of distance from nozzle exit to impinged surface L=2D and jet-to-jet distance S=2D, 4D. However, for case of L>2D, the local heat transfer rate on impinged surface decreases and heat transfer patterns were complex when compare with conventional impinging jets case.

1. คำนำ

การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเจ็ทของไหลและพื้นผิวที่นิยมใช้ในการระบายความร้อนใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์อีเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงโดยเฉพาะพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว รวมถึงใช้ในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น อุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) โดยส่วนใหญ่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่กล่าวมาจะมีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่กว้าง จำเป็นต้องใช้เจ็ทหลายลำหรือกลุ่มเจ็ท เพื่อให้เพียงพอต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นในเจ็ทกลุ่มคือ จะเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กัน เมื่อเจ็ทพุ่งชนผนังก็จะเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทบนผนังจากนั้นเจ็ทก็จะระบายออกนอกบริเวณที่พุ่งชน ซึ่งจะมีผลที่ตามมาคือ บริเวณที่เจ็ทผสมกันบนผนังและระบายออกนอกบริเวณที่พุ่งชนนั้นจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่ต่ำมาก ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนผนังไม่สม่ำเสมอ ซึ่งหลาย ๆงานวิจัยพยายามที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยศึกษาตัวแปรระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ท เพื่อที่จะ

กำหนดตัวแปรที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่สูงและมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่สม่ำเสมอมากที่สุด

San และ Lai [1] ได้ทำการทดลองใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิว 5 ลำ โดยการจัดเรียงหัวฉีดให้ 1 ลำอยู่ตรงกลางและอีก 4 ลำที่เหลือล้อมรอบเป็นสี่เหลี่ยมโดยที่ด้านกว้าง ลำเจ็ทจะทำมุมต่อกัน 60° และด้านยาวลำเจ็ทจะทำมุม 120° โดยที่ค่าเรย์โนลด์ที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง Re=10,000 - 20,000 พบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน (ระยะพุ่งชน) และระยะห่างระหว่างเจ็ท โดยที่ระยะพุ่งชน L=8D พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท S=2D จะเหมาะสมที่สุด และในกรณีที่ระยะพุ่งชน L=2D พบว่าระยะห่างระหว่างเจ็ท S=3D จะเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ San และคณะ [2] ได้ใช้ชุดทดลองรูปแบบเดียวกัน ทำการทดลองในกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททั้งหมดให้เท่ากัน และอีกกรณีปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบให้แตกต่างกัน โดยทดลองในช่วงค่าเรย์โนลด์ Re=5,000 – 15,000 จากผลการการทดลองพบว่าในกรณีที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทให้เท่ากันทั้งหมด อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะต่ำกว่าเจ็ทที่อยู่รอบ ๆ และกรณีที่ปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางและเจ็ทที่อยู่รอบ ๆให้แตกต่างกัน โดยให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางคงที่และปรับค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่อยู่รอบ ๆให้สูงขึ้น พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางจะสูงขึ้นตามการเพิ่มค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทที่รอบ

Barata [3] ได้ศึกษาเกี่ยวลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน 3 ลำ กรณีที่เรียงเป็นแถว ผลการทดลองได้เสนอเกี่ยวกับที่มาของการเกิดกระแสไหลวนขึ้น (Upwash flow) เกิดจากเจ็ท 2 ลำที่อยู่ติดกัน หลังจากเจ็ทพุ่งชนผนังแล้วเจ็ทที่ไหลบนผนังที่สวนทางกันจะเกิดการปะทะกันและไหลจากผนังขึ้นด้านบน

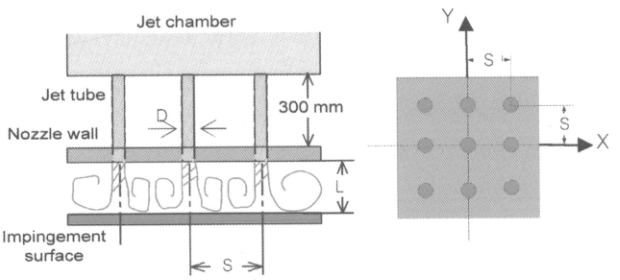
Brevet และคณะ [4] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนที่เรียงกันแบบ 1 แถว และ 3 แถว ในแต่ละแถวจะมีเจ็ทเรียงกัน 3 ลำ โดยจำลองชุดทดลองให้เหมือนลักษณะการระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ คือ ปรับให้กระแสลมทิ้ง (Spent air) หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนแล้วไหลไปยังทางออกทางเดียว จากผลการทดลองปรากฏว่าเงื่อนไขที่เหมาะสำหรับการจะนำไปใช้จะอยู่ในช่วงระยะพุ่งชน L= 2D-5D และในช่วงระหว่างนี้ที่ระยะพุ่งชน L=3D จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และหากมีการเพิ่มค่าเรย์โนลด์พร้อมกับลดระยะห่างระหว่างเจ็ทแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยเฉพาะบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง โดยใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิวแทนเจ็ทจากท่อเปล่า ในเบื้องต้นจะศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการไหลของเจ็ทกลุ่มแบบหมุนควง ในกรณีที่เจ็ทอากาศพ่นออกมาจากหัวฉีดแบบท่อ (Pipe nozzle) จำนวน 9 ท่อที่วางเรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว สำหรับการสร้างเจ็ทหมุนควงจะสอดแผ่นบิด (Twisted tape) ในท่อเจ็ท ซึ่งระยะพิตช์ของเกลียวแผ่นบิดหรือจำนวนรอบที่บิดต่อความยาวแผ่นบิดจะมีผลต่อระดับความหมุนควงของเจ็ท ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ระยะพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, และ 8D ระยะห่างระหว่างเจ็ท S= 2D, 4D, 6D, และ 8D ระดับของการหมุนควง (Swirl number) Sw=0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 และได้ศึกษากรณีของเจ็ทท่อเปล่า (ไม่ใส่แผ่นบิด) เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทแบบหมุนควง ในแต่ละการทดลองจะกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่เท่ากับ 25,000 สำหรับวิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC) วัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคเชิงทัศน์ฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลกับการถ่ายเทความร้อน

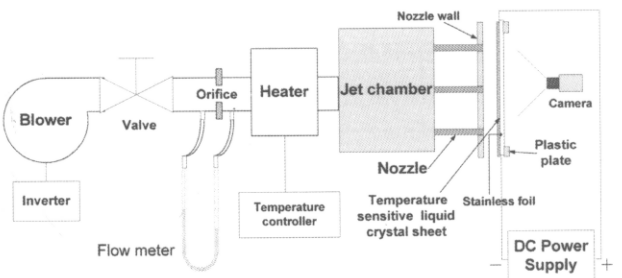
2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของโมเดลการทดลอง ในการทดลองจะใช้เจ็ทจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (D) 16.5 mm จำนวน 9 ท่อ เรียงกัน 3 แถว แถวละ 3 ท่อ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทและระยะระหว่างแถวของเจ็ทเท่ากัน สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, และ 8D ระยะห่างระหว่างเจ็ท S= 2D, 4D, 6D, และ 8D โดยที่กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททุกการทดลองคงที่ Re=25,000 (ใช้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ทและความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ทในการคำนวณ)



รูปที่ 1 แสดงโมเดลการทดลองและลักษณะการเรียงของท่อเจ็ท



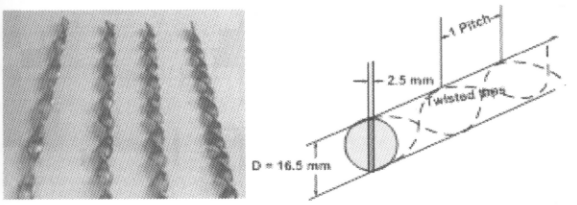
รูปที่ 2 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบรเวอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยอินเวอเตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะเข้าห้องกักอากาศและผ่านไปยังท่อเจ็ท ในการทดลองนี้ที่

ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ทไว้ดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน ชุดทดลองนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะพุ่งชนและระยะห่างระหว่างเจ็ทได้

2.2 ตัวกำเนิดกระแสหมุนควง

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะของแผ่นบิดที่สอดในท่อเจ็ท แผ่นบิดนี้ทำจากแผ่นสเตนเลสแบนมีความหนา 2.5 mm ขนาดความกว้างประมาณ 16.5 mm มีขนาดความยาว 300 mm บิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิดสอดในลักษณะเสมอกับปากทางออกของท่อเจ็ท และสันของแผ่นบิดที่ตำแหน่งปลายท่อเจ็ทจะอยู่ในตำแหน่งแนวดิ่งดังแสดงในรูปที่ 3 ทุกการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท

ในงานวิจัยนี้ระดับความแรงของการหมุนควงของเจ็ทจะนิยามโดยใช้ค่า Swirl Number (Sw) ซึ่งมีนิยามคือ

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \tag{1}$$

ในที่นี้ G_θ คือฟลักซ์โมเมนตัมเชิงมุมตามแนวแกนเจ็ท, G_n คือ ฟลักซ์โมเมนตัมเชิงเส้นตามแนวแกนเจ็ทและ R คือรัศมีท่อเจ็ท โดยที่ค่าฟลักซ์ในแต่ละเทอมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทได้ดังนี้ คือ

$$G_n = 2\pi\int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi\rho V_n^2 R^2 \tag{2}$$

$$G_\theta = 2\pi\int_0^R \rho V_n V_\theta r^2 dr = \frac{\pi\rho V_n \omega R^4}{2} \tag{3}$$

เมื่อ V_n คือความเร็วในแนวแกนของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, V_θ คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, ρ คือความหนาแน่นของเจ็ท ในที่นี้จะสมมุติให้ V_n มีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี และให้ $V_\theta = \omega r$ โดยที่ ω คือความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี

ในกรณีที่ใช้แผ่นบิดสอดในท่อเจ็ท ความเร็วเชิงมุมของเจ็ทจะคำนวณได้จากจำนวนพิตช์ (n) และความยาวแผ่นบิด (l) ดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \tag{4}$$

จากสมการทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ของค่า Swirl number ดังนี้

$$Sw = \frac{\pi n R}{l} \tag{5}$$

ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์นี้พบว่า ค่า Swirl number นี้ไม่ขึ้นกับความเร็วของเจ็ท แต่อย่างไรก็ตามสมการความสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้นนี้ได้มาจากสมมุติฐานของกรณีที่สมมุติให้ความเร็วในแกนของเจ็ท และความเร็วเชิงมุมของเจ็ทคงที่ตลอดทางออกของท่อเจ็ท ซึ่งตามความเป็นจริงแล้ว จะเกิดชั้นขอบเขตการไหลบริเวณใกล้ผนังท่อเจ็ท ทำให้ความเร็วในแกนของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งรัศมีของท่อเจ็ท ดังนั้นค่า Swirl number ที่ได้จากสมการข้างต้นเป็นค่าประมาณทางทฤษฎีเท่านั้น สำหรับค่า Swirl number จริงนั้นจำเป็นต้องหาจากการวัดการกระจายความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ ที่ปากทางออกของท่อเจ็ท ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแผ่นบิดทั้งหมดที่สร้างขึ้นและค่าประมาณทางทฤษฎีของ Swirl number ของแผ่นบิดแต่ละแบบ

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนพิตช์ต่อความยาวและค่า Swirl number

Number of pitch (l=300mm)	Swirl number
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

2.3 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่น Temperature sensitive liquid crystal (TLC)

ในการทดลองนี้จะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบาง (Stainless foil) ที่มีความหนา 0.03 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสเตนเลสนี้จะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 mm x 220 mm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q = \frac{I^2 R}{A} \tag{6}$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส

สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนนั้นจะวัดโดยใช้แผ่น TLC ติดด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่น TLC ที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30°C ถึง 35°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC และได้ใช้เทคนิคการประมวลภาพในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิตอลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก คือ แดง (R) เขียว (G) น้ำเงิน (B) และเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้จะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{q}{T_{LC} - T_j} \quad (7)$$

โดยที่ T_{LC} คืออุณหภูมิของพื้นผิวพุ่งชนที่วัดจากแผ่น TLC, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทในห้องกักอากาศ และ Nusselt number บนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (8)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

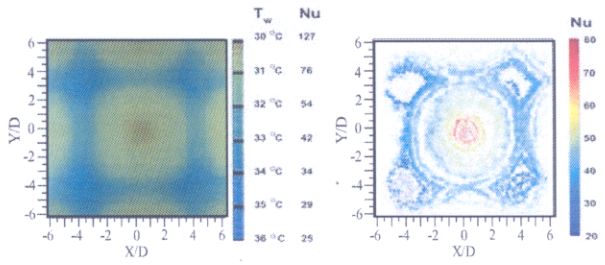
เส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC จะเป็นเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิหรือเส้น Isotherm และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (7) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากันด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น TLC ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างที่จะแคบ (ประมาณ 5°C) เพื่อให้สามารถศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว ในการทดลองจะควบคุมสภาวะการไหลให้คงเดิม (ระยะพุ่งชน ระยะห่างระหว่างเจ็ท อัตราการไหลของเจ็ทและอุณหภูมิของเจ็ท) แต่จะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าหรืออัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีแต่ละเส้นเปลี่ยนตำแหน่งและหลังจากการกระจายอุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จึงบันทึกภาพแผ่น TLC โดยกล้องดิจิตอล และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเคลื่อนที่ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งเส้นแถบสีแต่ละเส้นสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ และหากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

2.4 วิธีการศึกษาการไหลของเจ็ทบนผนังโดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique)

ในการทดลองนี้จะศึกษาพฤติกรรมการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทคนิคเชิงทัศน์ฟิล์มน้ำมัน (Oil film technique) การทดลองจะใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชนแทนแผ่นสเตนเลส และบนพื้นผิวด้านที่เจ็ทพุ่งชนจะทาน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลว ผงไททาเนียมไดออกไซด์ และกรดโอเลอิกบางๆ ทั่วทั้งพื้นผิว หลังจากนั้นจะให้เจ็ทพุ่งชนผิวน้ำมัน แล้วบันทึกการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่างๆ จากด้านหลังของผนังใสโดยใช้กล้องดิจิตอล

3. ผลการทดลอง

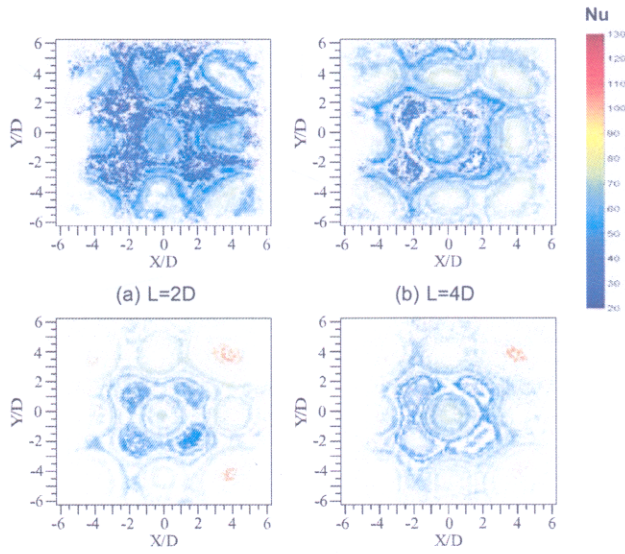
รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการกระจายของ Nusselt number ที่ได้จากการประมวลภาพ โดยรูปที่ 4(a) เป็นภาพถ่ายของแผ่น TLC แสดงการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิว และค่า Nusselt number สามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิของแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่น TLC โดยบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอุณหภูมิต่ำและมีค่า Nusselt number ที่สูง ส่วนบริเวณห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนอุณหภูมิจะสูงขึ้นและค่า Nusselt number จะลดลงตามลำดับ ในรูปที่ 4(b) แสดงการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิว โดยวิธีเลือกเส้นสีเหลืองจากแผ่น TLC ที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนต่างๆ มาซ้อนกันโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์



(a) ภาพถ่ายของแผ่น TLC (b) การกระจายของค่า Nu

รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิบนแผ่น TLC และการกระจายของ Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข q =300 W/m^2 และ T_j = 28.5 °C (เจ็ทท่อเปล่า, L=4D, S=8D)

3.1 ผลของระยะพุ่งชนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

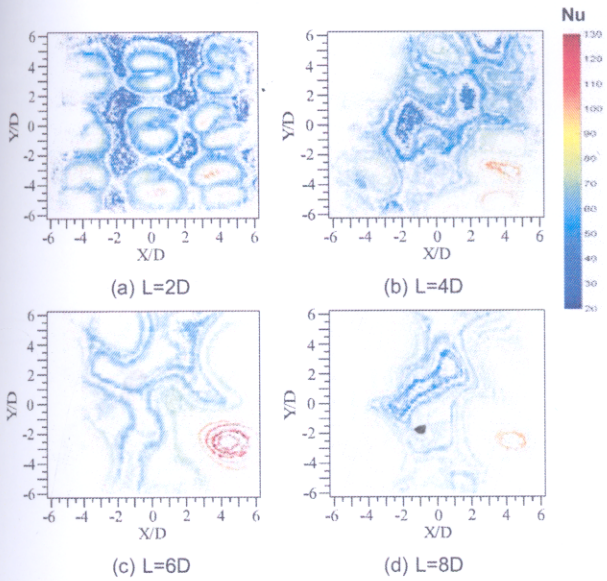


(a) L=2D (b) L=4D

(c) L=6D (d) L=8D

รูปที่ 5 แสดงการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทจากท่อเปล่าพุ่งชนที่เงื่อนไข S=4D

รูปที่ 5 แสดงการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวของเจ็ทท่อเปล่าที่เงื่อนไข S=4D และระยะพุ่งชนต่างๆ จากรูปพบว่าที่ระยะพุ่งชน L=2D (รูปที่ 5 (a)) อัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น และเกิดบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำขึ้นเป็นบริเวณกว้างระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เนื่องจากเจ็ทที่ออกจากท่อเจ็ทจะพุ่งชนผนังทันที แต่เมื่อระยะพุ่งชน L เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5 (b) - 5 (d)) พบว่าพื้นที่ของบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำนี้จะลดลงตามลำดับ เนื่องจากเจ็ทแต่ละลำจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นก่อนพุ่งชนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้นเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ยังพบว่าการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะพุ่งชนเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เจ็ทหมุนควง Sw=0.78 พุ่งชนที่เงื่อนไข S=4D

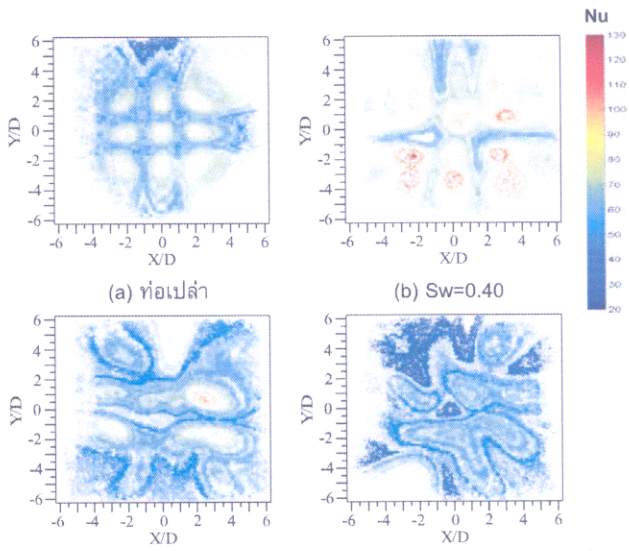
รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิว ในกรณีที่ใช้เจ็ทหมุนควงที่ Sw=0.78 แทนเจ็ทจากท่อเปล่าที่เงื่อนไข S=4D จากรูปนี้พบว่าที่ระยะพุ่งชน L=2D (รูปที่ 6 (a)) จะสามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทหมุนควงแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิวได้ชัดเจน และหากเปรียบเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ทั้งในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงและบริเวณรอบ ๆ ที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำจะมีพื้นที่ลดลง แต่เมื่อเพิ่มระยะพุ่งชน L (รูปที่ 6 (b) – 6 (d)) พบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงที่อยู่ติดกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง

3.2 ผลของระดับความหมุนควงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทต่าง ๆ

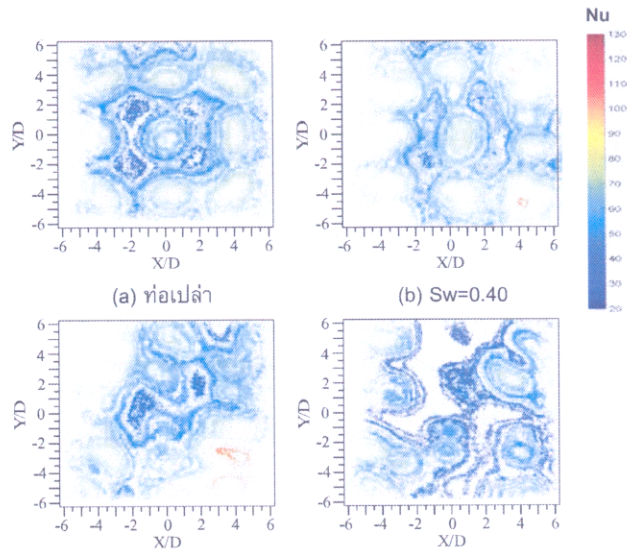
รูปที่ 7 ถึงรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผลของระดับความหมุนควง (Swirl number, Sw) ที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน L=4D สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างเจ็ท S=2D, 4D และ 8D

กรณีที่เงื่อนไข S=2D, L=4D (รูปที่ 7) อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เงื่อนไข Sw=0.40 จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทท่อเปล่า โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (เปรียบเทียบรูปที่ 7 (a) และ 7(b)) แต่ในกรณีที่เพิ่มค่า Sw>0.40 (รูปที่ 7 (c) และ 7(d)) อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิวจะลดลงและมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้น เนื่องจากเกิดจากการผสมกันระหว่างเจ็ทก่อนพุ่งชนซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงเมื่อ Sw เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีนี้ที่มีระยะห่างระหว่างเจ็ท S น้อย

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S=4D (รูปที่ 8) การใช้เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 แทนเจ็ทจากท่อเปล่าสามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงได้ แต่ไม่สามารถลดบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อเพิ่มค่า Sw พบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่เป็นระเบียบ

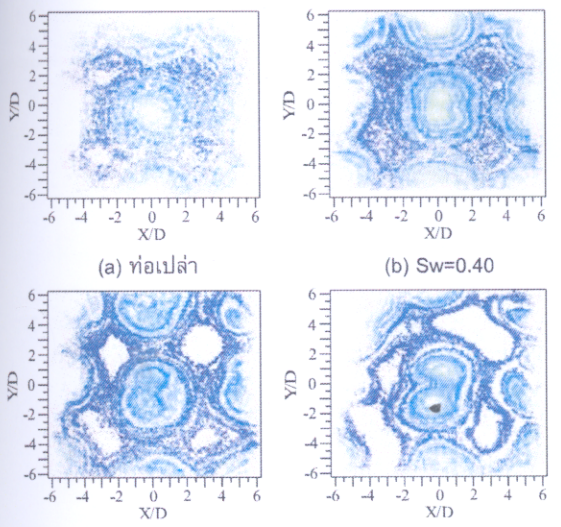


รูปที่ 7 แสดงผลของระดับความหมุนควงที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข S=2D, L=4D



รูปที่ 8 แสดงผลของระดับความหมุนควงที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข S=4D, L=4D

สำหรับในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทเพิ่มขึ้นเป็น S=6D (รูปที่ 9) สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนได้ชัดเจนทุกเงื่อนไขระดับความหมุนควง และอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความหมุนควงของเจ็ท แต่ในบริเวณรอบ ๆจะพบบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งระดับความหมุนควงของเจ็ทจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้



(a) ท่อเปล่า (b) Sw=0.40

(c) Sw=0.62 (d) Sw=0.78

รูปที่ 9 แสดงผลของระดับความหมุนควงที่มีต่อการกระจายของค่า Nusselt number บนพื้นผิวที่เงื่อนไข S=6D, L=4D

3.3 ลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว

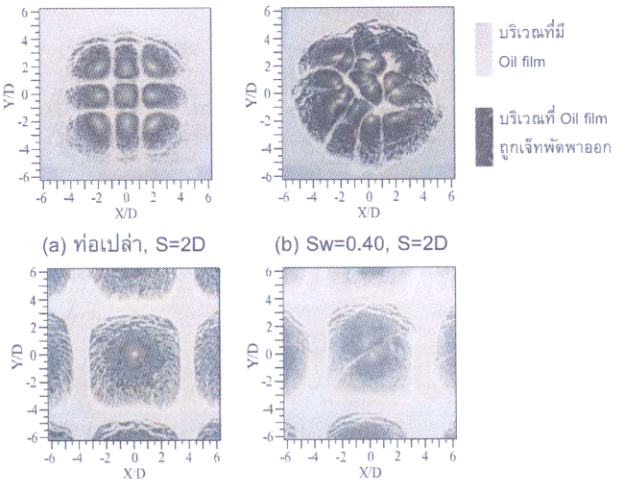
รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างผลการศึกษาการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมันเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทแบบหมุนควง จากรูปบริเวณที่เป็นสีขาวจะเป็นบริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันเคลือบอยู่ และบริเวณสีดำเป็นพื้นผิวของผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปหมด จากภาพถ่ายของฟิล์มน้ำมันจะสามารถสังเกตการไหลของบริเวณต่างๆ บนพื้นผิวได้ ตำแหน่งที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชน (หรือ Stagnation point) จะสังเกตได้ว่ามีฟิล์มน้ำมันเป็นบริเวณสีขาวเกาะติดอยู่ ส่วนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) จะเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปรอบๆ จากจุดที่เจ็ทพุ่งชน จะเห็นเป็นบริเวณของผนังสีดำไม่มีน้ำมันเกาะติดเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนผนัง ในบริเวณนี้ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว สามารถเห็นเป็นบริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำ และบริเวณที่มีน้ำมันสีขาวสะสมอยู่ระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลของเจ็ทหมุนควงที่มีต่อการไหลในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S=2D และ S=8D ที่เงื่อนไข L=2D จากรูปพบว่าในกรณีที่เงื่อนไข S=2D บริเวณที่น้ำมันถูกพัดพาออกจากผิวที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชนจะกว้างกรณีของเจ็ทท่อเปล่า และผลของการหมุนควงของเจ็ทช่วยลดบริเวณที่น้ำมันสะสมหรือบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ สำหรับกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ท S=8D พบว่าผลของการหมุนควงของเจ็ทจะมีผลต่อการไหลในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น แต่มีผลต่อบริเวณที่มีน้ำมันสะสมอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งผลเหล่านี้สอดคล้องกับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

3.4 สรุปผลการทดลอง

(1) ที่ระยะพุ่งชน L=2D การใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิวแทนเจ็ทจากท่อเปล่าจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนได้ แต่หากเพิ่มระยะพุ่งชน L จะทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงที่อยู่ติดกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว

(2) ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทมีค่าน้อย S=2D, 4D การใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อเปล่าจะสามารถช่วยลดพื้นที่บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำระหว่างบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้ แต่ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทเพิ่มสูงขึ้น S=6D, 8D เจ็ทหมุนควง จะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้เพียงเล็กน้อย และไม่สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณระหว่างที่เจ็ทพุ่งชนได้



(a) ท่อเปล่า, S=2D (b) Sw=0.40, S=2D

(c) ท่อเปล่า, S=8D (d) Sw=0.40, S=8D

รูปที่ 10 แสดงผลการศึกษาการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน (L=2D)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Jung-Yang San, Mao De Lai, 2001. Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp.3997-4007.
2. Jung-Yang San, Yi-Ming Tsou, Zheng-Chieh Chen, 2007. Impingement heat transfer of staggered arrays of air jets confined a channel. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.50, pp.3718-3727.
3. Barata, J. M. M., 1996. Fountain flows produced by multiple impinging jets in cross flow. AIAA Journal, Vol.34, pp.2523-2530.
4. P. Brevet, C. Dejeu, E. Dorignac, M. Jolly, J.J. Vullierme, 2002. Heat transfer to a row of impinging jets in consideration of optimization. Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp. 4191-4200.

ภาคผนวก ฌ5

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 7, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2552
จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 590-595.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7
8-9 พฤษภาคม 2552

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนผนังด้วยวิธีเชิงทัศน์

Study of flow behaviors of swirling jet impinging on a wall using visualization method

มักตาร์ แวหะยี ชยุต นันทดุสิต*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

Makatar Wae-hayee Chayut Nuntadusit*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสเวิร์ลนัมเบอร์และระยะห่างจากปากจากออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงบนพื้นผิว ในการทดลองได้ศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำโดยใช้วิธีเชิงทัศน์ คือวิธีผสมสีกับเจ็ทน้ำเพื่อดูลักษณะการกระจายของลำเจ็ท และวิธีใช้เข็มฉีดสีที่ตำแหน่งปากทางออกเจ็ทเพื่อดูโครงสร้างการไหลภายในเจ็ท สำหรับการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควงได้ใช้แผ่นบิดที่มีความยาวพิตช์ต่างๆสอดในท่อเจ็ท ผลการทดลองพบว่าเจ็ทหมุนควงที่ไหลออกจากปากท่อจะแบ่งการไหลออกเป็นสองลำแล้วไหลพุ่งชนพื้นผิวและเกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่ง เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทเพิ่มขึ้น มุมระหว่างกระแสการไหลที่ออกจากหัวฉีดจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทกับน้ำที่อยู่รอบๆเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวได้น้อยลงและมีโครงสร้างการไหลที่ซับซ้อน มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนตามไปด้วย

คำหลัก การถ่ายเทความร้อน, พฤติกรรมการไหล, เจ็ทพุ่งชน, เจ็ทหมุนควง

Abstract

In this study, the effects of Swirl number and distance from nozzle to impinged surface on flow behavior of swirling jet when impinging normally to surface were investigated for understanding heat transfer mechanism on impinged surface. In experiment, the flow behavior of a water swirling jet was studied in a water tank using visualization techniques. The jet spreading behavior was visualized by mixing jet with dye water and the flow structure in swirling jet was visualized by injecting dye with needles setting at the outlet of jet nozzle. A twisted plate with different twisted pitch length was inserted in nozzle pipe to generate swirling jet flow. The results show that the swirling jet from nozzle outlet is divided into two of streams and then impinge on the surface and two regions of high heat transfer rate appear on impinged wall. When the Swirl number of jet increases, the angle between two streams from nozzle outlet becomes larger and the mixing between jet and ambient water increases. When the distance from nozzle to impinged surface increases, the impingement of swirling jet on surface becomes weaker and the flow structure of jet becomes more complex, so the heat transfer on impinged surface decreases and heat transfer distribution is more complex.

Keywords: Heat transfer, Flow behavior, Impinging jet, Swirling jet

1. บทนำ

วิธีการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว (Impinging jet) ถูกนำมาใช้ในกระบวนการให้ความร้อนและระบายความร้อนในงานอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น การอบให้ความร้อนแก้ว แผ่นโลหะ หรือสิ่งทอ การระบายความร้อนในกังหันใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ การระบายความร้อนของ

อุปกรณ์อิเลกทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากวิธีนี้ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงโดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงในบริเวณที่ห่างออกจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน โดยปกติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งหากสามารถควบคุมการไหลของเจ็ทได้แล้วจะสามารถควบคุมการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวได้ด้วย เช่น การให้หรือระบายความร้อนเฉพาะจุดหรือเป็นบริเวณกว้าง ที่ผ่านมาทางคณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้เจ็ทหมุนควงเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากเจ็ทหมุนควงจะมีการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆมากกว่าเจ็ทแบบไม่หมุนควง ทำให้ระดับความปั่นป่วนภายในเจ็ทสูงขึ้นและเจ็ทหมุนควงมีอัตราการขยายตัวที่สูงทำให้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นบริเวณกว้างขึ้น [1,2,3] สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณรอบๆได้ จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงที่สร้างโดยสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ทเบื้องต้น [4] พบว่า บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะเกิดบริเวณที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง 2 บริเวณอยู่ห่างกัน และเมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทและระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น ระยะห่างระหว่างทั้งสองบริเวณนี้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้างโดยเฉพาะกรณีที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L<8D แต่อย่างไรก็ตาม ยังขาดข้อมูลเกี่ยวกับการไหลของเจ็ท ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ท

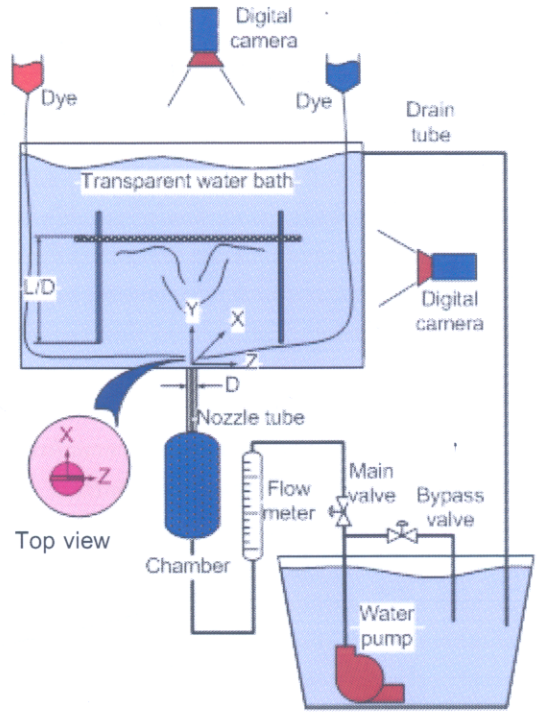
2. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

ในการทดลองจะศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำในตู้น้ำด้วยวิธีเชิงทัศน์ เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของเจ็ทหมุนควงอิสระและโครงสร้างการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิว นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาการไหลของเจ็ท

2.1 ชุดทดลอง

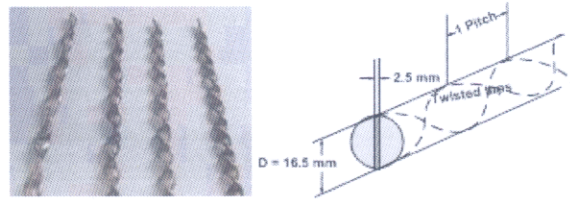
รูปที่ 1 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง โดยตู้น้ำที่ใช้ในการศึกษาจะทำจากแผ่นพลาสติกใสมีขนาดกว้าง 60 cm ยาว 62 cm และสูง 50 cm เพื่อให้สามารถดูการไหลของเจ็ทได้ ในการทดลองเจ็ทน้ำจะถูกส่งจากถังเก็บน้ำด้านล่างโดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 250 วัตต์ ผ่านวาล์วปรับอัตราการไหลและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบลูกลอยไปยังถังพักน้ำและท่อเจ็ท โดยเจ็ทน้ำจะออกจากท่อเจ็ทที่ต่อกับบริเวณตรงกลางของผนังด้านล่างของตู้น้ำ ในการศึกษาการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจะติดตั้งแผ่นเรียบที่ทำจากแผ่นพลาสติกใสหนา 10 mm เหนือปากทางออกของท่อเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 1 ในการทดลองสามารถปรับระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ และเมื่อต้องการศึกษาการไหลของเจ็ทอิสระจะนำแผ่นที่เจ็ทพุ่งชนนี้ออกจากตู้น้ำ

จากรูปที่ 1 กำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัด และให้แกน X อยู่ในแนวตั้งฉากกับสันของแผ่นบิด แกน Y อยู่ในแนวที่เจ็ทไหลออกจากท่อ และแกน Z อยู่ในแนวเดียวกับสันของแผ่นบิด



รูปที่ 1 ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง

2.2 ตัวกำเนิดกระแสหมุนควง



รูปที่ 2 แผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบิดในท่อเจ็ท

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของแผ่นบิดที่สร้างขึ้นและลักษณะของแผ่นบิดที่สอดในท่อเจ็ท แผ่นบิดนี้ทำจากแผ่นสเตนเลสแบนมีความหนา 2.5 mm ขนาดความกว้าง 16.5 mm มีขนาดความยาว 300 mm บิดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และสอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิดสอดในลักษณะเสมอกับปากทางออกของท่อเจ็ท เนื่องจากแผ่นบิดเป็นตัวแยกการไหลในท่อเจ็ทและเกลียวของแผ่น

บิดจะบังคับให้เกิดการไหลแบบหมุนควงภายในท่อ ดังนั้นการไหลที่ออกมาจากท่อเจ็ทจะแยกการไหลออกเป็นสองลำ

สำหรับระดับความแรงของการหมุนควงของเจ็ทจะนิยามโดยใช้ค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl Number) ซึ่งมีนิยาม คือ

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \qquad (1)$$

ในที่นี้ G_θ คือฟลักซ์โมเมนตัมเชิงมุมตามแนวแกนเจ็ท, G_n คือฟลักซ์โมเมนตัมเชิงเส้นตามแนวแกนเจ็ทและ R คือรัศมีท่อเจ็ท โดยค่าฟลักซ์ในแต่ละเทอมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทได้ดังนี้ คือ

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \qquad (2)$$

$$G_\theta = 2\pi \int_0^R \rho V_n V_\theta r^2 dr = \frac{\pi \rho V_n \omega R^4}{2} \qquad (3)$$

เมื่อ V_n คือความเร็วในแนวแกนของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, V_θ คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมี (r) ใดๆ, ρ คือความหนาแน่นของเจ็ท ในที่นี้จะสมมุติให้ V_n มีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี และให้ $V_\theta = \omega r$ โดยที่ ω คือความเร็วเชิงมุมมีค่าคงที่ตลอดแนวรัศมี ในกรณีที่ใช้แผ่นบิดสอดในท่อเจ็ท ความเร็วเชิงมุมของเจ็ทจะคำนวณได้จากจำนวนพิตช์ (n) และความยาวแผ่นบิด (l) ดังนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \qquad (4)$$

จากสมการทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ของค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ ดังนี้

$$Sw = \frac{\pi n R}{l} \qquad (5)$$

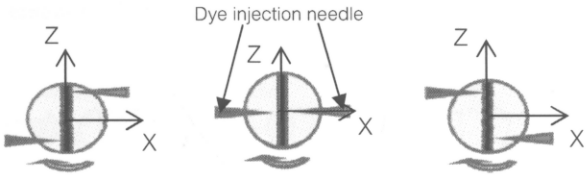
ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของแผ่นบิดทั้งหมดที่สร้างขึ้นและค่าประมาณทางทฤษฎีของสเวิร์ลนัมเบอร์ของแผ่นบิดแต่ละแบบ

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนพิตช์ต่อความยาวและค่าสเวิร์ลนัมเบอร์

Number of pitch (l =300mm)	Swirl number
0	0.00
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

2.3 การศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน์

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน์จะใช้วิธีผสมสีบานเย็นในถังน้ำของเจ็ทแล้วดูลักษณะการกระจายของเจ็ทสีที่ไหลออกจากท่อเจ็ท อีกวิธีหนึ่งจะใช้เข็มฉีดสีที่ตำแหน่งปากทางออกของท่อเจ็ทเข้าไปในกระแสการไหลของเจ็ทน้ำ แล้วดูเส้นทางการไหลของสีในเจ็ท วิธีนี้สามารถดูโครงสร้างการไหลภายในเจ็ทได้ ในการทดลองได้วางเข็มฉีดสี 3 ลักษณะที่ปากทางออกของท่อเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อติดตามดูเส้นทางการไหลจากเข็มฉีดสีแต่ละตำแหน่งจะใช้สีที่แตกต่างกัน คือ สีบานเย็นและสีน้ำเงินฉีดออกจากแต่ละเข็ม



(ก) ตำแหน่ง A (ข) ตำแหน่ง B (ค) ตำแหน่ง C

รูปที่ 3 ลักษณะการวางเข็มสีที่ปากทางออกของเจ็ท

นอกจากนี้ได้ติดตั้งกล้องบันทึกภาพแบบดิจิตอลและหลอดไฟให้แสงสว่างโดยตำแหน่งการติดตั้งกล้องบันทึกภาพมีอยู่สองตำแหน่ง คือด้านข้างและด้านบนของตู้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ตำแหน่งของกล้องที่อยู่ด้านข้างจะจับภาพการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนผนัง และกล้องที่อยู่ด้านบนจะจับภาพการไหลของเจ็ทบนผนัง

2.4 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ในการทดลองใช้เจ็ทน้ำอุณหภูมิ 30°C พุ่งชนบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ q=447 W/m^2 เพื่อระบายความร้อน ในการทดลองได้ใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางเป็นแผ่นที่เจ็ทพุ่งชน โดยขึงแผ่นสเตนเลสให้ตึงและยึดด้วยแผ่นทองแดงทั้งสองข้างกับแผ่นพลาสติกใส และจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟไหลผ่านเพื่อให้เกิดฟลักซ์ความร้อนขึ้นตลอดทั้งผิว สำหรับการวัดการกระจายอุณหภูมิและศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอลที่เปลี่ยนสีจากดำ น้ำตาล เหลือง เขียว น้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ 30-36°C ติดบนแผ่นสเตนเลสที่ผิวด้านตรงข้ามกับผิวด้านที่เจ็ทน้ำพุ่งชน

3. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

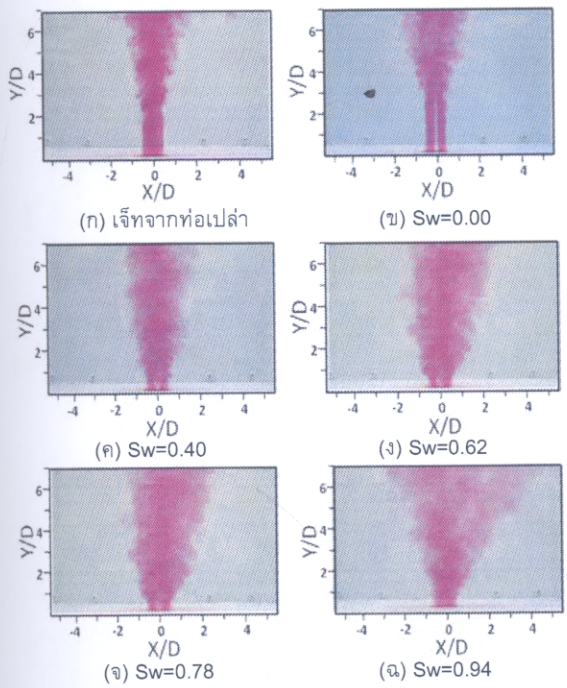
ในแต่ละการทดลองจะกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทน้ำคงที่ โดยมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่คิดจากอัตราการไหลเท่ากับ Re= 760 สำหรับตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, 8D และ 10D (โดยที่ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อเจ็ท) และค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทหมุนควง Sw=0.0, 0.40, 0.62, 0.78 และ 0.94 นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีของเจ็ทท่อเปล่า (ไม่ใส่แผ่นบิด) เพื่อเปรียบเทียบการไหลกับกรณีของเจ็ทแบบหมุนควงด้วย

4. ผลการศึกษา

4.1 ลักษณะการกระจายของเจ็ทอิสระ

รูปที่ 4 แสดงลักษณะการกระจายของเจ็ทอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ จากรูปพบว่าเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 ที่บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ทในช่วง Y/D=0-2 จะมีลักษณะเป็นลำออกจากปากทางออก หลังจากนั้นเจ็ทจะเริ่ม

กระจายตัวออกทางด้านข้าง และเจ็ทที่เงื่อนไข Sw=0.00 จะเกิดบริเวณที่ไม่มีสีในลำเจ็ทซึ่งเป็นผลจากสันของแผ่นบิด สำหรับเจ็ทหมุนควง การกระจายของเจ็ทออกทางด้านข้างเริ่มเกิดขึ้นที่ตำแหน่งปากทางออก (Y/D=0) และการขยายตัวของเจ็ทจะเพิ่มขึ้นตามสเวิร์ลนัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองนี้สามารถดูได้เพียงการกระจายของเจ็ทเท่านั้น ไม่สามารถเห็นโครงสร้างการไหลที่เกิดขึ้นภายในเจ็ทได้



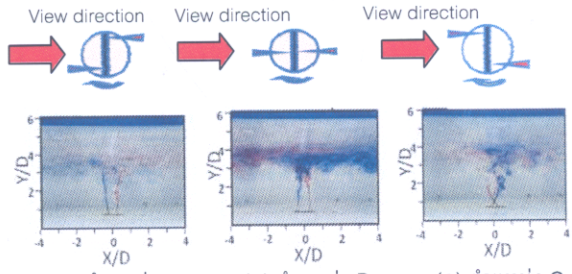
(ก) เจ็ทจากท่อเปล่า (ข) Sw=0.00
(ค) Sw=0.40 (ง) Sw=0.62
(จ) Sw=0.78 (ฉ) Sw=0.94

รูปที่ 4 ลักษณะการกระจายของเจ็ทอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ (Re=760)

4.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนผนัง

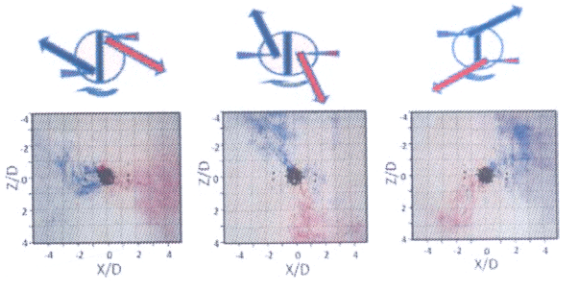
การศึกษาโครงสร้างการไหลภายในเจ็ทวิธีหนึ่งจะใช้เข็มฉีดสีที่ปากทางออกของท่อเจ็ทเข้าไปในกระแสการไหลของเจ็ทน้ำ แล้วดูเส้นทางการไหลของสี รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างของลักษณะการไหลกรณีที่วางเข็มฉีดสี 3 ลักษณะที่ปากทางออกของท่อเจ็ท จากรูปพบว่าเส้นทางการไหลของเจ็ทจากแต่ละตำแหน่งที่ปากทางออกจะต่างกัน โดยที่เจ็ทที่ตำแหน่ง A ใกล้กับสันแผ่นบิดตรงขอบท่อจะไหลแยกห่างจากกันก่อนที่จะพุ่งชนผนัง เจ็ทที่ตำแหน่ง B ตรงกลางช่องทั้งสองของท่อจะไหลเข้าหากันและเกิดการผสมกันก่อนที่จะพุ่งชนผนัง และเจ็ทที่ตำแหน่ง C ใกล้กับสันแผ่นบิดตรงขอบท่อจะไหลออกในแนวเอียงทำมุมกับแกนการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนผนัง

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างลักษณะการไหลของเจ็ทบนผนังในกรณีที่ถ่ายภาพจากด้านบนของผนัง ในรูปแสดงเส้นทางการไหลของสีหรือเส้นทางการไหลของเจ็ทบนผนังจากเข็มฉีดสีที่วางในแต่ละตำแหน่งที่ปากทางออก โดยเส้นทางการไหลของเจ็ทจากเข็มฉีดสีบนผนังสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแล้วเจ็ทจะไหลออกในแนวรัศมี โดยที่ทิศทางการไหลของเจ็ทบนผนังจะได้รับอิทธิพลจากการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนผนัง ซึ่งจะสอดคล้องกับทิศทางการหมุนควงของแผ่นบิด



(ก) ตำแหน่ง A (ข) ตำแหน่ง B (ค) ตำแหน่ง C

รูปที่ 5 เส้นทางการไหลของสีตามการวางเข็มสีทั้งสามแบบในกรณีเจ็ทพุ่งชนผนัง Sw=0.62, L= 4D, Re=760 (ถ่ายรูปจากด้านข้าง)

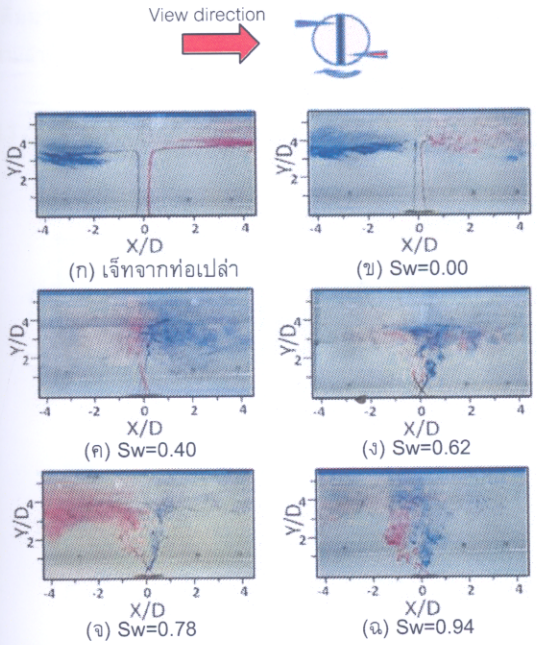


(ก) ตำแหน่ง A (ข) ตำแหน่ง B (ค) ตำแหน่ง C

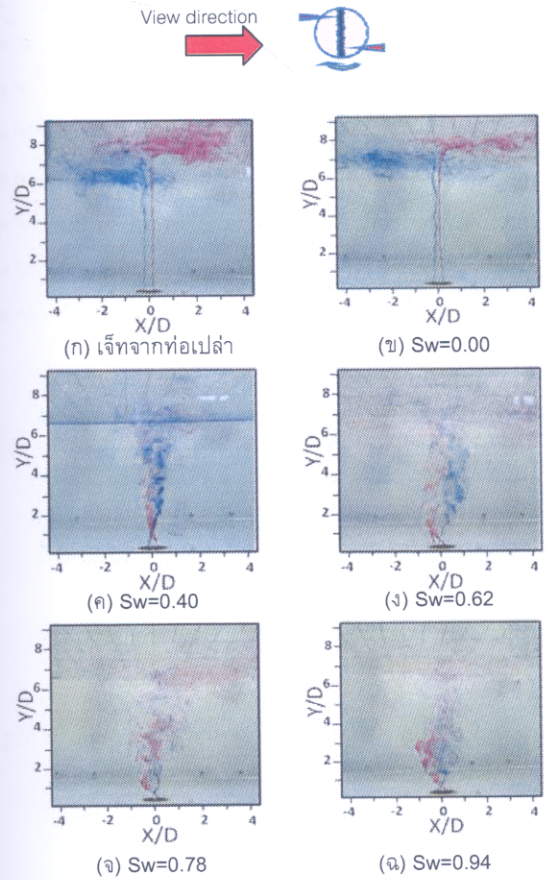
รูปที่ 6 เส้นทางการไหลของสีตามการวางเข็มสีทั้งสามแบบในกรณีเจ็ทพุ่งชนผนัง Sw=0.40, L=4D, Re=760 (ถ่ายรูปจากด้านบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน)

รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนผนังที่ระยะ L=4D และ 8D ตามลำดับ ในแต่ละรูปจะวางเข็มฉีดสีในตำแหน่ง C ซึ่งเจ็ทที่อยู่ด้านขวามือของสันแผ่นบิดจะแทนด้วยสีบานเย็นและเจ็ทที่อยู่ด้านซ้ายมือจะแทนด้วยสีน้ำเงิน จากรูปพบว่าที่ระยะพุ่งชน L=4D และ 8D เส้นทางการไหลของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่ Sw=0.00 จะอยู่ในแนวแกน Y เท่านั้น

ในขณะที่เจ็ทที่มีค่าสเวิร์ลนัมเบอร์มากกว่าศูนย์ สเวิร์ลนัมเบอร์จะมีผลต่อมุมของเส้นทางการไหลของเจ็ทหมุนควงที่ตำแหน่งปากทางออก เมื่อค่าสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มขึ้น มุมของเจ็ทที่ทำกับแนวแกนการไหล (แกน Y) จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ มีผลทำให้การกระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้นและเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่ในบริเวณรอบๆ มากขึ้น หลังจากที่เจ็ทมีความเร็วลดลงที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกจะสามารถสังเกตบริเวณที่เกิดการผสมกันระหว่างเส้นสีน้ำเงินและเส้นสีบานเย็นขึ้น ซึ่งในบริเวณนี้จะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อน

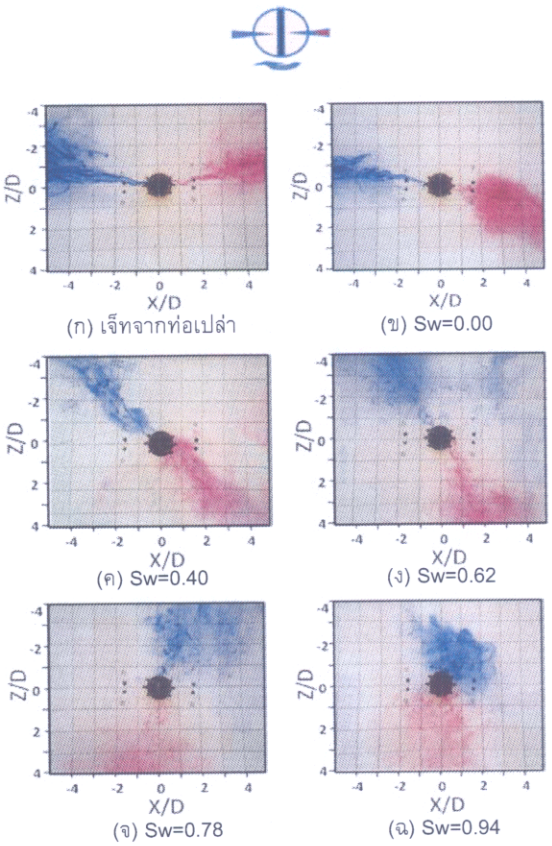


รูปที่ 7 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนผนังที่ระยะ L=4D (วางเข็มตำแหน่ง C, Re=760)



รูปที่ 8 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนผนังที่ระยะ L=8D (วางเข็มตำแหน่ง C, Re=760)

จากผลการทดลองในกรณีที่ระยะ L=4D (รูปที่ 7) พบว่าเมื่อค่าสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มขึ้น ก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวเจ็ทจะขยายตัวและพุ่งชนพื้นผิวเป็นบริเวณกว้างขึ้น และระยะห่างระหว่างตำแหน่งของเส้นที่แต่ละเส้นที่พุ่งชนผนังจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนผนัง คือในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะเกิดตำแหน่งที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณ และระยะห่างระหว่างบริเวณทั้งสองนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทหมุนควงเพิ่มขึ้น [4] และในกรณีที่ระยะเพิ่มขึ้นเป็น L=8D (รูปที่ 8) พบว่าเมื่อเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทหมุนควงจะทำให้เจ็ทเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่รอบๆมากขึ้น และการพุ่งชนของเจ็ทบนผนังจะลดลงโดยเฉพาะที่เงื่อนไข Sw>0.40

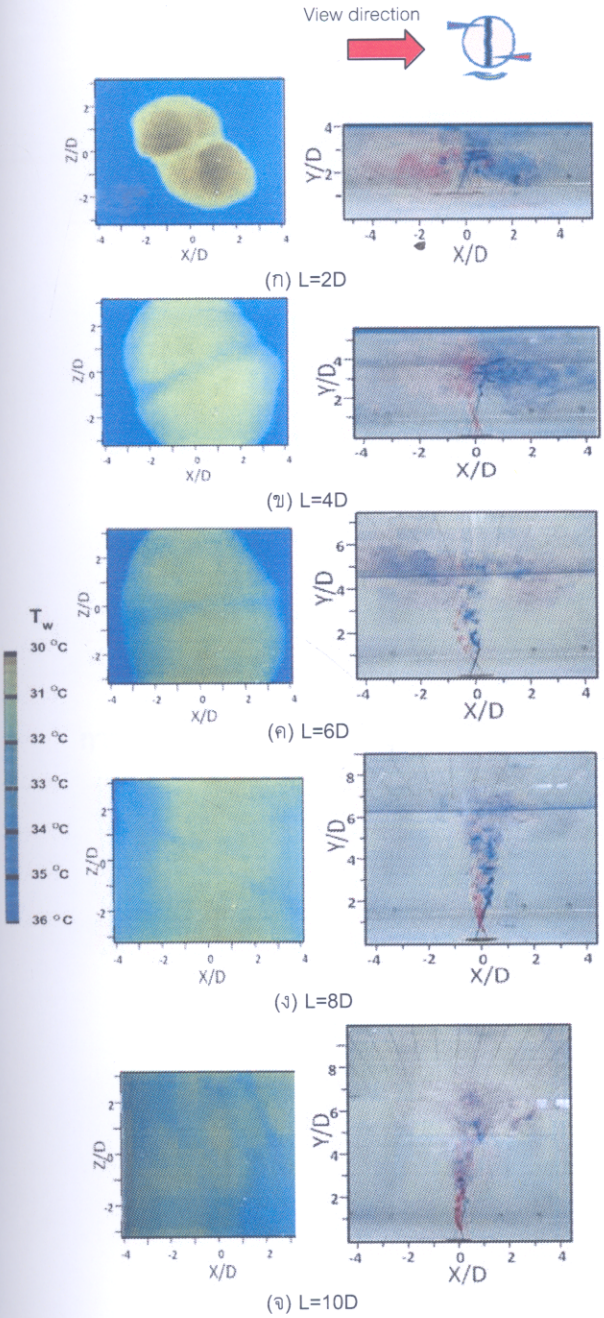


รูปที่ 9 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนผนังที่เงื่อนไข L= 2D, Re=760 (วางเข็มที่ตำแหน่ง B, ถ่ายรูปจากด้านบนของผนัง)

รูปที่ 9 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนผนังที่เงื่อนไข L=2D ในรูปเข็มฉีดสีวางอยู่ในตำแหน่ง B และถ่ายภาพจากด้านบนของผนัง จากรูปพบว่าสเวิร์ลนัมเบอร์จะมีผลต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนผนังดังนี้ กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทกรณีที่ Sw=0.00 เจ็ทจะไหลบนผนังตามแนวแกน X ไปทางด้านซ้ายและขวาในแนวรัศมี กรณีเจ็ทหมุนควง Sw=0.40 เจ็ทที่ไหลบนผนังจะไหลออกในแนวรัศมีทำมุมบิดกับแนวแกน X ตามเข็มนาฬิกาประมาณ 45° และเมื่อค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ท

เพิ่มมากขึ้นมุมบิดของเจ็ทที่ไหลบนผนังก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

4.3 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 10 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (เข็มฉีดสีวางที่ตำแหน่ง C) และการไหลของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข Sw=0.40 (q=447 W/m^2,T_j=30°C)

รูปที่ 10 แสดงผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อเส้นทางการไหลในกรณีเจ็ทหมุนควง Sw=0.40 พุ่งชนผนัง จากรูปพบว่าที่ระยะ L=2D เจ็ทจะไหลออกจากหัวฉีดและพุ่งชนผนังทันที และเมื่อระยะ L เพิ่มขึ้นจะเกิดการผสมกันระหว่างเส้นสีก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนผนัง ทำให้โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนผนังลดลง เนื่องจากการผสมระหว่างเจ็ทกับน้ำที่อยู่รอบๆ สำหรับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว พบว่าที่ระยะ L=2D จะเกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงแยกออกเป็นสองบริเวณที่ห่างจากกันเอียงทำมุมกับแกน X ดังแสดงในรูป ที่ระยะ L=4D การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะขยายเป็นบริเวณกว้างขึ้นแต่การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณี L=2D เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนผนังลดลง เช่นเดียวกับที่ระยะ L=6D และ 8D พบว่าพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นแต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง และที่ระยะ L=10D การถ่ายเทความร้อนจะมีลักษณะที่ซับซ้อนตามการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว

5. สรุป

เจ็ทหมุนควงจากท่อที่สอดแผ่นบิดจะแบ่งออกเป็นการไหลสองลำแล้วไหลพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดบริเวณที่การถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่งห่างกัน เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทเพิ่มขึ้น มุมของกระแสเจ็ทที่ไหลออกจากท่อเจ็ทจะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การผสมกันของเจ็ทกับน้ำที่อยู่รอบๆเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวได้น้อยลงและมีโครงสร้างการไหลที่ซับซ้อน มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนตามไปด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

เอกสารอ้างอิง

[1] S.V. Alekseenko, A.V.Bilsky, V.M.Dulin, D.M.Markovich, Experimental study of an impinging jet with different swirl rates, 2007, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp.1340-1359

[2] L. Huang, M.S. El-Genk, Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets,, 1998, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.41, pp. 583-600

[3] M.Y. Wen, K.J. Jang, An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips, 2003, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.46, pp. 4657-4667

[4] มักตาร์ แวหะยี, ชยุต นันทดุสิต และ อศิ บุญจิตราดุลย์. 2551. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ. การประชุมการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 7, 13-14 มีนาคม 2551 จังหวัดเชียงใหม่ หน้าที่ 158-163

ภาคผนวก ฌ6

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 – 7 พฤศจิกายน 2552
จังหวัดเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หมายเลขบทความ TSF-008060

TSF-028059

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

Wall Heat Transfer Measurement Technique Using Thermochromic Liquid Crystal Sheet

มักตาร์ แวหะยี[1] และ ชยุต นันทดุสิต[1*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

*ผู้ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th, โทร 0-7428-7035, โทรสาร 0-7421-2893

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดอุณหภูมิและการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวและของไหลโดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล ในบทความจะอธิบายถึงคุณสมบัติของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล วิธีการใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลในการวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีเชิงทัศน์และเชิงปริมาณ วิธีการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวและจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในงานวิจัย เช่น การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิว

คำหลัก: เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล, วิธีเชิงทัศน์, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Abstract

The objective of this article is to introduce measurement method of temperature and convective heat transfer coefficient using temperature dependent characteristic of Thermochromic Liquid Crystal (TLC) Sheet. This article describes the property of Thermochromic Liquid Crystal, temperature calibration method, qualitative and quantitative temperature measurement method and convective heat transfer coefficient measurement on a surface. This article also describes example in applying this method to study heat transfer phenomena such as jet impingement on flat surface.

Keywords: Thermochromic Liquid Crystal, Visualization technique, Heat transfer coefficient

1. บทนำ

การวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวหนึ่งๆ เทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นการวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสโดยตรงโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล หรือใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Gauge) ติดบนผิววัสดุโดยตรงเพื่อวัดอุณหภูมิหรืออัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่ต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนแบบเฉพาะตำแหน่งโดยละเอียดนั้น จำเป็นต้องติดหัววัด (Probe) เป็นจำนวนมากบนพื้นผิวและทำการวัดค่าพร้อมๆ กัน ในกรณีที่บนพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณแคบๆจะไม่สามารถทำการวัดได้โดยละเอียด อีกทั้งวิธีนี้มีการสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสายสัญญาณจากหัววัด ทำให้การวัดค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวคลาดเคลื่อนไป และมีผลทำให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนคลาดเคลื่อนไปด้วย

การวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared Thermometry) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวก เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยการวัดการแผ่รังสีจากผิววัตถุ แต่การใช้งานจำเป็นต้องทราบสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิเพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่แม่นยำและเชื่อถือได้ และในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีบนพื้นผิวมีค่าต่ำๆ จะทำให้การวัดคลาดเคลื่อนได้สูง ซึ่งการวัดโดยวิธีนี้จะขึ้นกับสิ่งแวดล้อมในการวัดมาก และในบางกรณีไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ เช่น การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่จมในของเหลว เนื่องจากรังสีอินฟราเรดจากพื้นผิวไม่สามารถผ่านของเหลวได้หมด เหตุผลอีกอย่างคืออุปกรณ์วัดมีราคาค่อนข้างสูง

เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (Thermochromic liquid crystals, TLCs) เป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยมากกว่า 30 ปี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ประหยัด และสะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดที่ซับซ้อน สามารถดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่าได้ และในปัจจุบันมีการพัฒนาของอุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิตอลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น สามารถใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเลคทรอนิก กังหันแก๊สเทอร์ไบน์ หรือการวัดการให้ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆในอุตสาหกรรม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลในการวัดอุณหภูมินั้น จำเป็นต้องเลือกชนิดของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด และต้องทำการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ ในบทความนี้จะแนะนำเกี่ยวกับวิธีการใช้เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลสำหรับการวัดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว และตัวอย่างการนำไปใช้ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน

2. เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นสารประกอบจำพวกออแกนิคที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่สารลิกควิดคริสตอลมีสถานะเป็นของแข็งเมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความ

ยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสารนี้

สำหรับการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และจะไปเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะมีหลายสูตร มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ (T_{bs}-T_{rs}) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นกับส่วนผสมที่ใช้ผลิต เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตร้าไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm อยู่ในรูปของผงบรรจุในแคปซูลขนาดเล็ก หรือของเหลวสำหรับทาบนผิวหรือโพลิเมอร์แบบแผ่นแบนอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติด สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ

3. วิธีการวัดอุณหภูมิ

ในการนำไปประยุกต์ใช้วัดอุณหภูมิ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามช่วงความกว้างอุณหภูมิที่เปลี่ยนสี คือ ประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบ(Narrow-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 1°C -2°C และประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง (Wide-band TLC) จะมีการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5°C-20°C การเลือกใช้ประเภทของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานและช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด ในการวัดอุณหภูมิที่ต้องการความละเอียดจะใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลแบบช่วงแคบ ในกรณีต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวสามารถใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลแบบช่วงแคบหลายชนิดผสมกัน (Multi-event narrow-band TLC) หรือใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลแบบช่วงกว้างแทน ซึ่งสามารถแสดงการกระจายของเส้นอุณหภูมิคงที่หรือเส้นของสีต่างๆ บนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียว

สำหรับสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบมีข้อดีคือ มีความถูกต้องและความละเอียดในการวัดอุณหภูมิสูงและสะดวกในการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ ใช้ระบบประมวลภาพที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้ในการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้างได้ ในขณะที่สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลประเภทเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้าง สามารถดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งหมด แต่ต้องใช้ระบบประมวลภาพที่ซับซ้อนเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิแบบเชิงปริมาณที่แม่นยำ

3.2 การสอบเทียบอุณหภูมิ

การสอบเทียบสีกับอุณหภูมิเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดมีผลต่อความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล สามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีสอบเทียบสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ (Isotherm) และวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนผนัง (Temperature gradient) ที่ทราบอุณหภูมิ

สำหรับวิธีสอบเทียบอุณหภูมิบนผนังที่มีอุณหภูมิคงที่ วิธีนี้จะควบคุมอุณหภูมิบนผิวที่เคลือบสารหรือติดแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลให้คงที่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นและใช้กล้องดิจิตอลในการบันทึกสี เพื่อสร้างข้อมูลสอบเทียบระหว่างสีกับอุณหภูมิ การ

สอบเทียบทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิบนผนังจนสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเริ่มเปลี่ยนสี หลังจากนั้นจะทำการบันทึกอุณหภูมิบนผนังในขณะนั้นและบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล กระบวนการนี้จะทำซ้ำที่อุณหภูมิผนังสูงขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม ถึงแม้ขั้นตอนของการสอบเทียบและอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อน แต่ต้องใช้เวลาในการสอบเทียบมาก เนื่องจากต้องทำการสอบเทียบข้อมูลเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้ข้อมูลของสีสำหรับใช้วัดอุณหภูมิเพียงพอ

สำหรับวิธีสอบเทียบบนผนังที่มีการกระจายอุณหภูมิ(Gradient method) วิธีที่นี้จะทำการติดแผ่นหรือเคลือบสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล บนผนังที่มีการกระจายบนอุณหภูมิ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเชิงเส้นและทราบอุณหภูมิแต่ละจุด วิธีนี้สามารถสอบเทียบอุณหภูมิและสีบนเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลได้อย่างต่อเนื่อง เพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสีบนผนังและของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้ได้ข้อมูลของการสอบเทียบมากกว่าวิธีแรก และเวลาในการสอบเทียบน้อยกว่า สามารถได้ข้อมูลระหว่างสีกับอุณหภูมิจากการบันทึกภาพเพียงครั้งเดียว

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าใช้การสอบเทียบโดยวิธีใดก็ตาม ระบบบันทึกภาพ เงื่อนไขการให้แสงสว่างและการถ่ายภาพ เช่น มุมการให้แสงและมุมบันทึกภาพ ที่ใช้ในการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิ ควรจะใช้เหมือนกับเงื่อนไขที่ใช้งานจริง

3.3 การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว

ในการวัดอุณหภูมิบางครั้งต้องการเพียงแค่อุณหภูมิโดยประมาณเท่านั้น การวัดอุณหภูมิจากสีของแผ่น เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล สามารถทำได้ด้วยการใช้สายตาเปล่าของมนุษย์ โดยไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดอื่นๆ สามารถดูการกระจายและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลได้ แต่การใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวจะขึ้นกับผู้สังเกตแต่ละคน ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดน้อยลง

Hoogendoorn [1] ใช้วิธีวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยเทียบสเกลของสีที่ทราบอุณหภูมิกับสี เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่ปรากฏบนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมิ ต่อมาได้มีการบันทึกภาพด้วยกล้องและใช้ฟิวเตอร์ในการเลือกสีแทนสายตามนุษย์ ต่อมา Goldstein และ Timmers [2] ทำการบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล โดยใช้กล้องขาวดำและฟิวเตอร์ หลังจากนั้นหาเส้นที่สว่างที่สุดจากภาพที่บันทึกได้ ซึ่งสามารถระบุเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm line) จากภาพที่ได้ แต่วิธีที่กล่าวมานี้สามารถใช้ในการหาเส้นอุณหภูมิคงที่ เท่านั้น ยังไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทุกจุดได้ ต่อมาได้มีการใช้กล้องบันทึกสีแบบดิจิตอลและเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ มาช่วยในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏเป็นข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกต Akino และคณะ [3] ได้ใช้ข้อมูลอุณหภูมิและข้อมูลค่าสีหลักทั้ง 3 ค่าที่ได้จากการสอบเทียบในการสร้างสมการโพลิโนเมียมอันดับที่ 2 เพื่อใช้ในการทำนายการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว อย่างไรก็ตามวิธีการนิยามนี้ ไม่เหมาะที่จะใช้ในการวัดอุณหภูมิเนื่องจากต้องใช้ค่าสีหลักทั้ง 3 ค่าคือ R-, G-, B- ในการแปลงเป็นอุณหภูมิที่แต่ละจุด (Pixel) บนภาพของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้งานจริง ต่อมา Camci [4] ได้พัฒนาวิธีการวัดโดยใช้ค่าของสีเพียงค่าเดียวในการวัดอุณหภูมิ โดยสีที่บันทึกในระบบ RGB จะถูกแปลงให้อยู่ในระบบ HSV และใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสเกลล่าร์ค่าสีหลัก (Hue, H) ในระบบ HSV และอุณหภูมิ (H = H(T)) และใช้ความสัมพันธ์นี้ในการทำนายอุณหภูมิบนพื้นผิว แต่ก็มีข้อควรระวังในการวัดด้วยวิธีนี้คือ คุณภาพของแสงที่ส่องสว่างบนเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล หรือแสงที่ส่องสว่างควรจะเหมือนกันระหว่างที่ใช้ในช่วงสอบเทียบสีและในการทดลองจริง มิฉะนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสีกับ

อุณหภูมิจะเปลี่ยนได้และทำให้อุณหภูมิที่วัดได้คลาดเคลื่อน แต่ในการใช้งานวัดจริงนั้น เงื่อนไขของแสงสว่างจะควบคุมให้เหมือนกันได้ยาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการส่องสว่างจำเป็นต้องนำไปพิจารณาด้วย ซึ่ง Farina และคณะ [5] ได้เสนอวิธีการใช้ภาพสีอ้างอิงก่อนการสอบเทียบสีกับอุณหภูมิและก่อนการนำไปใช้วัดจริง เพื่อที่จะแก้ไขปัญหานี้โดยการเทียบระหว่างสองภาพอ้างอิง

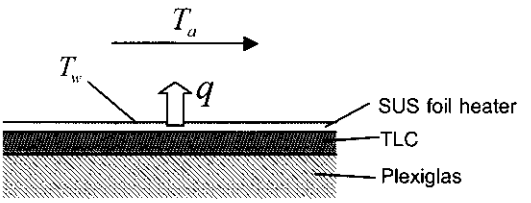
อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดที่พัฒนาโดย Camci [4] และ Farina และคณะ [5] ยังคงมีข้อจำกัด คือ อุณหภูมิในช่วงที่มากกว่า T_{bs} ค่าของสีหลัก (H) จะเปลี่ยนแปลงช้ามาก เป็นผลให้ความละเอียดในการวัดอุณหภูมิน้อยลง แม้ว่าสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเองยังมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างชัดเจนอยู่ นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า T_{rs} ความผิดพลาดของการวัดค่า R, G, B เพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีหลัก จากเหตุผลเหล่านี้ การใช้สีหลัก (Hue) จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นปริมาณในการระบุปริมาณสี เพื่อแก้ไขปัญหานี้ Nakabe และคณะ [6] ได้ใช้วิธีการแปลงสีเป็นอุณหภูมิ โดยใช้ 3 สีหลักทั้งหมด R-, G-, B- ที่ได้จากการบันทึกภาพและใช้ Neural Network Algorithm ในการแปลงข้อมูลสีเป็นข้อมูลอุณหภูมิ วิธีนี้สามารถช่วยลดความผิดพลาดจากการวัดได้ โดยเฉพาะในช่วงสีน้ำเงิน แต่ค่อนข้างจะซับซ้อนเมื่อเทียบกับการใช้สีหลักเพียงตัวเดียวในการพิจารณา

4. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการใช้วิธีแบบสภาวะคงตัวในกรณีที่ของไหลอุณหภูมิ T_a ไหลผ่าน ในรูปจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางเป็นพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิ และให้ความร้อนแก่พื้นผิวโดยผ่านกระแสไฟฟ้า I ผ่านแผ่นสเตนเลสที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้า R ค่าฟลักซ์ความร้อน $\dot{q}$ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสามารถคำนวณจากสมการ (1) และอุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิว T_w จะวัดจากสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่เคลือบบนด้านหลังของแผ่นสเตนเลส สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวแต่ละจุดสามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{A} \qquad (1)$$

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_a} \qquad (2)$$



รูปที่ 1 ตัวอย่างการใช้วิธีแบบสภาวะคงตัว

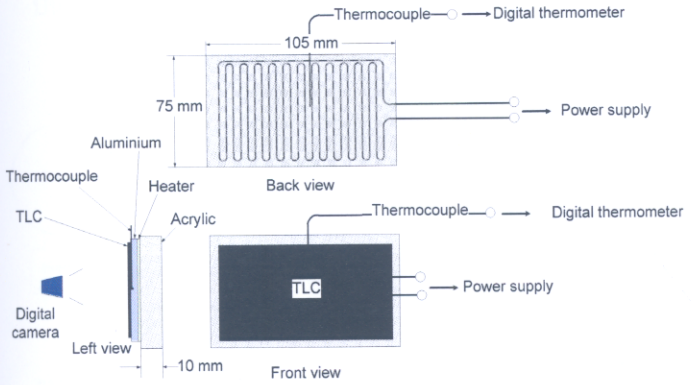
นอกจากนี้วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ประเภทของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นแบบเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิแคบหรือกว้างอีกด้วย สำหรับวิธีการใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ทั่วทั้งผิว ในกรณีใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่มีการเปลี่ยนสีในอุณหภูมิแคบจะไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิหรือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิวได้ ดังนั้นในการวัดจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวอย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง เนื่องจากเทคนิคนี้ต้องการเพียงหนึ่งสีหรือหนึ่งอุณหภูมิที่ได้จากการสอบเทียบเท่านั้น โดยปกติจะใช้เส้นสีเหลือง เพราะมีความสว่างค่อนข้างสูง ในการสร้างการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั้งพื้นผิวจำเป็นที่จะต้องใช้ภาพเป็นจำนวนมาก ความละเอียดและความถูกต้องของวิธีการวัดนี้จะขึ้นกับช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่ใช้และความละเอียดของการปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว การใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่เปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิกว้างแทนจะสามารถลดข้อจำกัดนี้ได้ สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทั้งหมดจากรูปภาพเพียงรูปเดียวในกรณีที่ช่วงการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลกว้างพอที่จะแสดงสีทั้งหมดบนพื้นผิววัด

อุณหภูมิ แต่เพื่อความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิ วิธีนี้ต้องการจำนวนจุดที่สอบเทียบจำนวนมาก

5. ตัวอย่างการนำไปใช้งาน

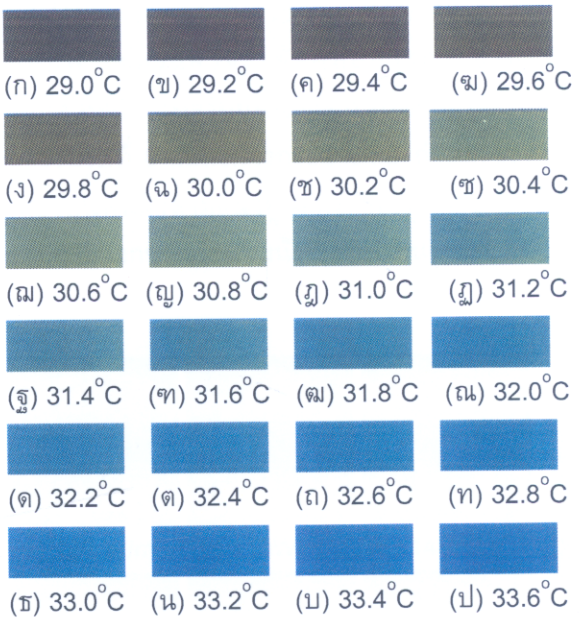
5.1 การสอบเทียบอุณหภูมิ

รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีดเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใส ขั้วของฮีดเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีดเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมบางซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีดเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลเพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิตอลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอล ด้านหน้าของแผ่นอลูมีเนียมได้เซาะร่องสำหรับติดสายเทอร์โมคับเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 28°C – 37°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม

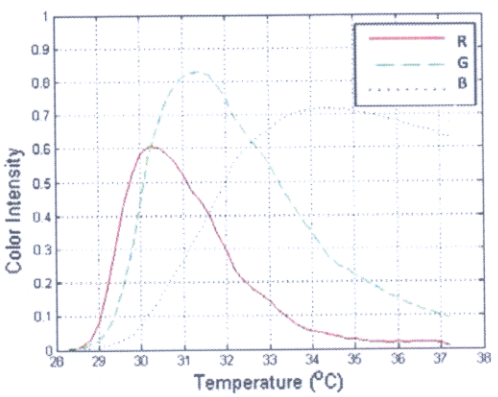


รูปที่ 2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างผลการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แยกตัวประกอบสี RGB แล้วนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวประกอบสีที่อุณหภูมิต่างๆ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟ R และ G ตัดกันที่อุณหภูมิ 30.2±0.2 °C และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลมีสีเหลืองตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3 (ช) จากนี้จะได้เงื่อนไขเส้นสีเหลืองที่มีส่วนประกอบของสี R ที่มีค่าเท่ากับสี G ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลการสอบเทียบ

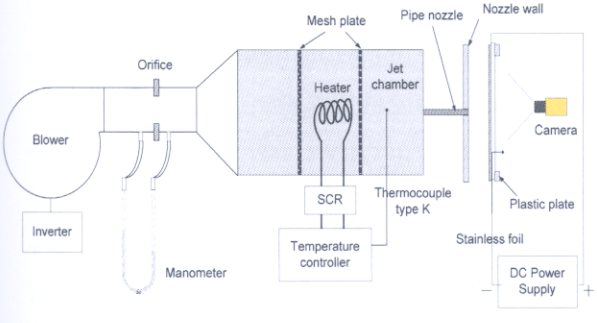


รูปที่ 4 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสีจากแผนเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

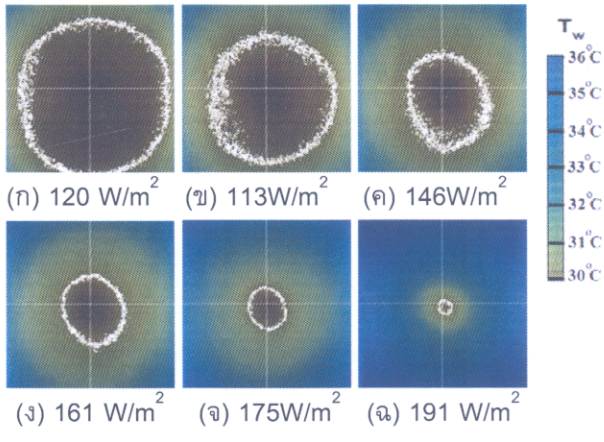
รูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน

โดยใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดครัสตอล ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D=16.5 mm พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, 8D และ10D และค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ที่ Re=20,000 เจ็ทอากาศจะถูกส่งจากโบรเวอร์ผ่านชุดของออร์ริฟิส ชุดฮีตเตอร์ ถังกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท สำหรับผนังที่เจ็ทพุ่งชนจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm ขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติก ที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ซึ่งที่ปลายของแผ่นสเตนเลสจะยึดด้วยแท่งทองแดงไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส จากนั้นเจ็ทอากาศที่อุณหภูมิห้องจะไหลชนแผนสเตนเลสเพื่อทำการระบายความร้อนบนพื้นผิว จากนี้สามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่ติดด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) ลักษณะสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะบันทึกโดยใช้กล้องดิจิตอล

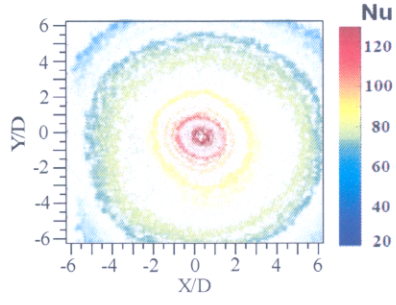


รูปที่ 5 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

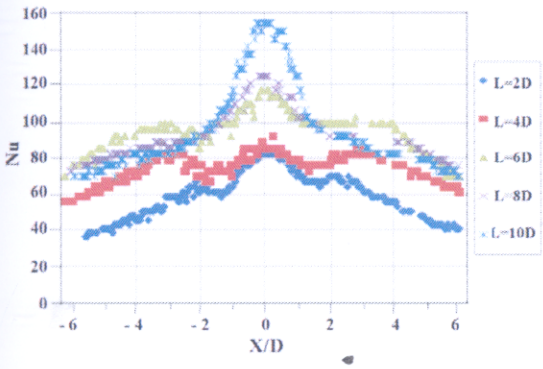
สำหรับการบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลนั้นเมื่ออุณหภูมิบนผนังเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าหรือฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีเหลือง (เส้นสีที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C) เปลี่ยนตำแหน่งจึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลอีกครั้ง และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเหลืองเคลื่อนที่ทั่วทั้งพื้นผิว รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่ทำการเปลี่ยนค่าฟลักซ์ความร้อนที่ค่าต่างๆ ซึ่งเส้นแถบสีเหลือง(จุดที่แทนด้วยสีขาว) สามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ หากนำรูปภาพที่บันทึกทั้งหมดมาประมวลผลโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพในคอมพิวเตอร์แล้วจะได้ข้อมูลการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7 และในรูปที่ 8 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวตามแนวศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะจากปากออกของเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่ระยะ L=10D (สีขาวแสดงเส้นที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2 °C หรือเส้นสีเหลือง)



รูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ L=10D



รูปที่ 8 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตอลในการวัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เป็นวิธีที่สะดวกและเหมาะสำหรับใช้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้หากทำการบันทึกภาพและใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว จะสามารถหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้นี้เป็นแบบวิธีสภาวะคงตัว อาศัยการเลื่อนตำแหน่งของแถบสีเมื่อเปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่ทำการวัดอุณหภูมิ ต้องใช้เวลาในการทดลองและต้องถ่ายภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์จำนวนมาก และมีข้อจำกัดคือไม่สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิวได้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีวัดแบบสภาวะไม่คงตัวที่ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่มีความซับซ้อนมากในการวิเคราะห์ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Hoogendoorn, C. J. (1977). The effect of turbulence on heat transfer at a stagnation point, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 20, pp. 1333 – 1338.

[2] Goldstein, R. J., Timmers, J. F. (1982). Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 25, pp. 1857 – 1868.

[3] Akino, N., Kunugi, T., Ueda, M. and Kurosawa, A. (1988). A study on thermo-camera using liquid crystal (method of multiple regression between color and temperature), *Transactions of JSME, Ser.(B)*, Vol. 54-506, pp.2661-2668.

[4] Camci, C. (1996). Color Recognition for Temperature Measurements on Liquid Crystal Coated Surfaces, *von Karman Institute Lecture series on Temperature Measurements*, VKI-LS-1996-09

[5] Farina, D. J., Hacker, J. M., Moffat, R. J., Eaton, J. K. (1994). Illuminant invariant calibration of thermochromic liquid crystals. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 9, pp.1 – 12

[6] Nakabe, K., Higashio, A., Chen, W., Suzuki, K. (1998) An experimental study on the flow and heat transfer characteristics of longitudinal vortices induced by an inclined impinging jet into a crossflow (Measurement of heat transfer coefficient using thermochromic liquid crystals), paper presented in *11th* International Heat Transfer conference, Kyongju, Korea

ภาคผนวก ฌ7

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 9) 11 – 12 มีนาคม 2553
ณ อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

Heat Transfer Coefficient Measurement on a Surface of Jet Impingement Using Thermochromic Liquid Crystal

มักตาร์ แวหะยี
ชยุต นันทตุสิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยทางด้านการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนนิยมใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล (Thermochromic liquid crystals, TLCs) เพื่อใช้ในการดูลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ง่าย ประหยัดและสามารถดูการกระจายอุณหภูมิจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่า บทความนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล และการใช้สารเทอร์โมโคมิคลิควิดคริสตอลในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะคงตัว (Steady-state) ในการทดลองได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโคมิคลิควิดคริสตอล เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จากการศึกษาพบว่า สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลสามารถแสดงลักษณะปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามการปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ นอกจากนี้ในการทดลองได้ทำการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองวิธีพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่หาจากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นบริเวณตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่วัดได้จากสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลมีค่าต่ำกว่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล

1. บทนำ

การวัดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวหนึ่งๆ เทคนิคการวัดแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไปจะเป็นการวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสโดยตรงโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล หรือใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux Gauge) ติดบนผิววัสดุโดยตรงเพื่อวัดอุณหภูมิหรืออัตราการถ่ายเทความร้อน แต่ในกรณีที่ต้องการวัดการกระจายอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนแบบเฉพาะตำแหน่งโดยละเอียด จำเป็นต้องติดหัววัด (Probe) เป็นจำนวนมากบนพื้นผิวและทำการวัดค่าพร้อมๆ กัน ในกรณีที่บนพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณแคบๆจะไม่สามารถทำการวัดได้โดยละเอียด อีกทั้งวิธีนี้มีการสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านสายสัญญาณจากหัววัด ทำให้การวัดค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวคลาดเคลื่อนไป และมีผลทำให้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนคลาดเคลื่อนไปด้วย สำหรับวิธีการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared Thermometry) เป็นอีกวิธีสามารถแสดงการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวได้อย่างละเอียด แต่อุปกรณ์วัดมีราคาค่อนข้างสูง

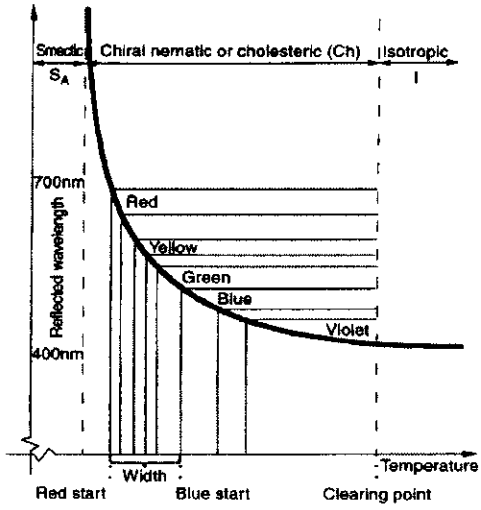
เทคนิคการวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโคมิคลิควิดคริสตอล (Thermochromic liquid crystals, TLCs) เป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัสโดยตรง อาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโคมิคลิควิดคริสตอลซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยมากกว่า 30 ปี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ประหยัด และสะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดที่ซับซ้อน สามารถดูการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่าได้ และในปัจจุบันมีการพัฒนาของอุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิตอลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น สามารถใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การระบายความร้อนใน

อุปกรณ์อิเลคทรอนิก กังหันแก๊สเทอร์ไบน์ หรือการวัดการให้ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆในอุตสาหกรรม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลในการวัดอุณหภูมิ จำเป็นต้องเลือกชนิดของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด และต้องทำการสอบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ [1]

ในบทความนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลสำหรับการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว ด้วยวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแบบสภาวะคงตัว และตัวอย่างการนำสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลไปใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยแสดงวิธีการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบกับวิธีการใช้เทอร์โมคัปเปิลในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

2. เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นสารประกอบจำพวกออแกนิคที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่สารลิกควิดคริสตอลมีสถานะเป็นของแข็ง เมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสาร



รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น (การสะท้อนสี) ของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด [2]

รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา หลังจากนั้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะมีหลายสูตร มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ (T_{bs}-T_{rs}) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นกับส่วนผสมที่ใช้ผลิต เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตร้าไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm อยู่ในรูปของผงบรรจุในแคปซูลขนาดเล็กหรือของเหลวสำหรับทาบนผิว สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ หรือเป็นแบบโพลิเมอร์แผ่นแบนอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติด [1-4]

3. การวัดอุณหภูมิโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล

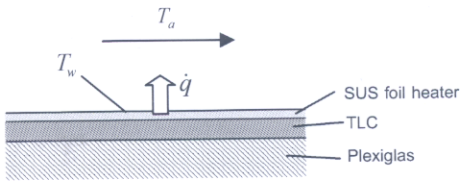
ในการวัดอุณหภูมิบางครั้งต้องการเพียงแค่อุณหภูมิโดยประมาณเท่านั้น สำหรับการวัดอุณหภูมิจากการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล สามารถทำได้ด้วยการใช้สายตาเปล่าของมนุษย์ โดยไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดอื่นๆ สามารถดูการกระจายและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลได้ แต่การใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวจะขึ้นกับผู้สังเกตแต่ละคน ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวัดน้อยลง

Hoogendoorn [5] ใช้วิธีวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยเทียบสเกลของสีที่ทราบอุณหภูมิกับสีเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่ปรากฏบนพื้นผิวที่วัดอุณหภูมิ ต่อมาได้มีการบันทึกภาพด้วยกล้องและใช้ฟิวเตอร์ในการเลือกสีแทนสายตามนุษย์ Goldstein และ Timmers [6] ทำการบันทึกภาพของเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล โดยใช้กล้องขาวดำและฟิลเตอร์ หลังจากนั้นหาเส้นที่สว่างที่สุดจากภาพที่บันทึกได้ ซึ่งสามารถระบุเส้นอุณหภูมิคงที่ (Isotherm line) จากภาพที่ได้ แต่วิธีที่กล่าวมานี้ สามารถใช้ในการหาเส้นอุณหภูมิคงที่เท่านั้น ยังไม่สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทุกจุดได้

ปัจจุบันเทคโนโลยีของการบันทึกภาพสีแบบดิจิตอลและเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนา ทำให้สามารถนำมาช่วยในการบันทึกและเปลี่ยนข้อมูลสีที่ปรากฏบนสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกต ในการแสดงภาพสีจะมีอยู่สองระบบหลักๆ คือ RGB และ HSV สำหรับการแสดงภาพสีของระบบ RGB จะเป็นการรวมกันของความเข้มของแสงสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ที่จุดภาพ แต่ในกรณีของระบบ HSV จะแสดงค่าสีหลัก (Hue) ค่าความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) และความสว่างของสี (Value) ที่จุดภาพ โดยสามารถแปลงจากระบบการแสดงภาพแบบ RGB สู่ระบบ HSV และในทางกลับกันสามารถแปลงจากระบบ HSV สู่ระบบ RGB สำหรับระบบ RGB จะใช้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแม่สีเทียบกับระดับของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ส่วนระบบ HSV จะใช้เฉพาะความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าสีหลักกับอุณหภูมิเท่านั้น สำหรับในบทความนี้ได้วิเคราะห์ภาพสีของแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิด

คริสตอลด้วยระบบการแสดงสีแบบ RGB เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความเสถียรมากกว่าระบบ HSV [2]

4. วิธีการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน



รูปที่ 2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีแบบสภาวะคงตัว

รูปที่ 2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีแบบสภาวะคงตัว ในกรณีที่ของไหลอุณหภูมิ T_a ไหลผ่าน ในรูปจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางเป็นพื้นผิวที่จะทำการวัดอุณหภูมิ ในการหาค่าฟลักซ์ความร้อนจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลไหลผ่านแผ่นสเตนเลสซึ่งสามารถหาค่าฟลักซ์ความร้อน $\dot{q}$ ได้จากสมการ

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{A} \qquad (1)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นสเตนเลส A และ R คือขนาดของพื้นผิวและค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสเตนเลสตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวแต่ละจุดได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_a} \qquad (2)$$

ในที่นี้ T_w คืออุณหภูมิแต่ละจุดบนพื้นผิวที่วัดได้จากสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลที่เคลือบด้านหลังของแผ่นสเตนเลส และ T_a คืออุณหภูมิของของไหล จากโมเดลการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวข้างต้น สามารถแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติหรือค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ (*Nu*)

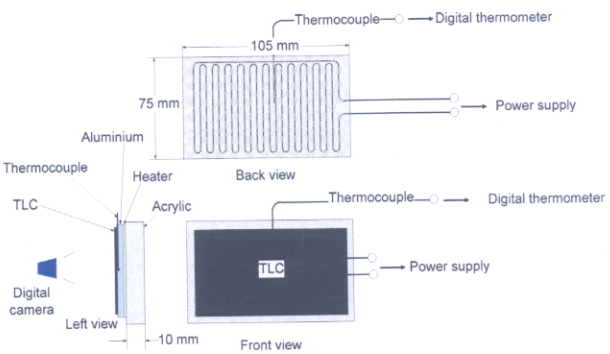
$$Nu = \frac{hD}{k} \qquad (3)$$

โดยที่ D คือ Characteristic length ซึ่งในกรณีที่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท และ k คือค่าการนำความร้อนของอากาศ ซึ่งในการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิบนพื้นผิวแต่ละครั้ง จะทำการบันทึกหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

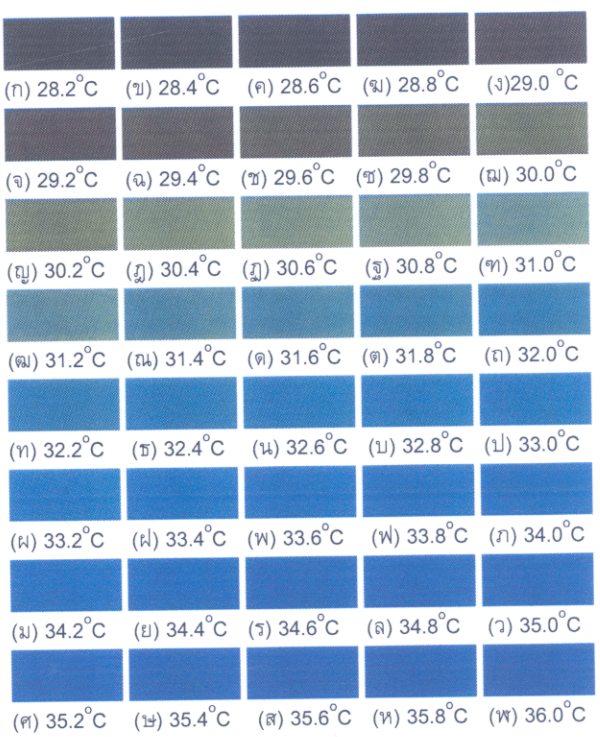
5. การวัดหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

5.1 การสอบเทียบอุณหภูมิ

ในการใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว จำเป็นที่จะต้องทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลก่อนใช้งาน รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีดเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใส ขั้วของฮีดเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีดเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมบางซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีดเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลเพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิตอลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอล ด้านหน้าของแผ่นอลูมีเนียมได้เซาะร่องสำหรับติดสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 28°C – 37°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม



รูปที่ 3 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลการสอบเทียบ

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างผลการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแยกตัวประกอบสี *RGB* ของแต่ละรูปให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติดังนี้

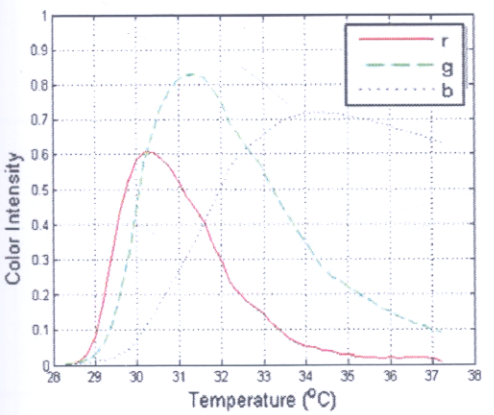
$$r = \frac{R - RB}{R_{\max} - RB} \quad (4)$$

$$g = \frac{G - GB}{G_{\max} - GB} \quad (5)$$

$$b = \frac{B - BB}{B_{\max} - BB} \quad (6)$$

ในที่นี้ R G และ B คือ ความเข้มของสีแดง เขียวและน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล RB GB และ BB คือ ความเข้มของสีแดง เขียวและน้ำเงิน ของรูปเริ่มต้นขณะที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี R_{max} G_{max} และ B_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีแดง เขียวและน้ำเงิน ที่แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ

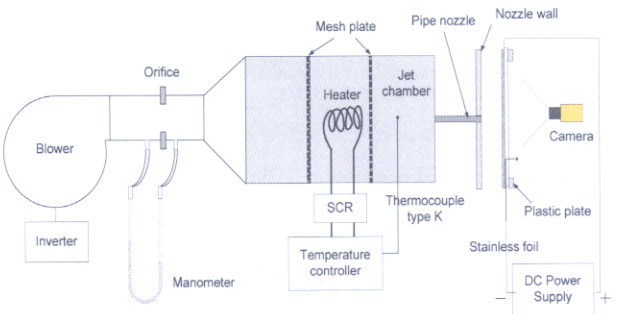
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวประกอบสีที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปจะได้ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟ r และ g ตัดกันที่อุณหภูมิ 30.2±0.2 °C และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลมีสีเขียวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 (ญ) จากนี้จะได้เงื่อนไขเส้นสีเขียวที่มีส่วนประกอบของสี r ที่มีค่าเท่ากับสี g ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป



รูปที่ 5 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสีจากแผนเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่อุณหภูมิต่างๆ

5.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

รูปที่ 6 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดครัสตอล ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D=16.5 mm พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ โดยกำหนดระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน L=2D, 4D, 6D, 8D และ10D และค่าเรย์โนลด์ของเจ็ทคงที่ Re=20,000 เจ็ทอากาศจะถูกส่งจากโบรเวอร์ผ่านชุดของออริฟิส ชุดฮีตเตอร์ ถังกักอากาศ และผ่านไปยังท่อเจ็ท สำหรับผนังที่เจ็ทพุ่งชนจะใช้แผ่นสเตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.030 mm ขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกที่เจาะหน้าต่างขนาด 220 cm x 220 cm ซึ่งที่ปลายของแผ่นสเตนเลสจะยึดด้วยแท่งทองแดงไว้ทั้งสองข้าง โดยต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสเตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสเตนเลส ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการเกิดความร้อนบนพื้นผิวแผ่นสเตนเลสได้จากสมการที่ (1) โดยที่ค่า R หาได้จากความต้านทานทางไฟฟ้าของแผ่นสเตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสเตนเลส จากนั้นเจ็ทอากาศที่อุณหภูมิห้องจะไหลชนแผ่นสเตนเลสเพื่อทำการระบายความร้อนบนพื้นผิว โดยสามารถวัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวจากแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่ติดด้านหลังของแผ่นสเตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) ลักษณะสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะบันทึกโดยใช้กล้องดิจิตอล จากนี้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้จากสมการที่ (2) โดยที่ T_w วัดจากการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอล และ T_a คืออุณหภูมิคงที่ของเจ็ท



รูปที่ 6 ชุดทดลองสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนผนัง

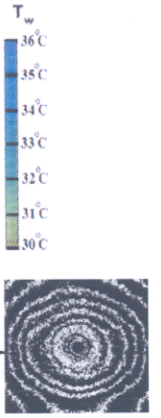
5.3 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

ในการทดลองได้ทำการบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลเมื่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นได้ทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าหรือฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว เมื่อตำแหน่งของเส้นแถบสีเขียว (เส้นสีที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C และสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ *r, g และ b*) เปลี่ยนตำแหน่งจึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลอีกครั้ง และจะทำการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าซ้ำอีกจนกระทั่งเส้นแถบสีเขียวเคลื่อนที่ทั่วทั้งพื้นผิว ซึ่งผลการทดลองอยู่ในรูปของการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตอลที่ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ จากนี้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะกล่าวต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้คอมพิวเตอร์ จากตารางค่าที่แสดงในคอลัมน์ที่ 2 เป็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณจากสมการ (1) ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่ 3 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคำนวณจากสมการ (2) และค่าจากตารางในคอลัมน์ที่ 4 เป็นนัสเซิลต์นัมเบอร์คำนวณจากสมการ (3) ของกรณีที่ใช้เส้นสีเขียว T_w=30.2 °C และอุณหภูมิของเจ็ท T_a=27.5 °C ในการคำนวณ จากลำดับที่ 1-12 ในตารางแสดงถึงผลการทดลองและการคำนวณค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวต่างๆ โดยกำหนดให้เส้นสีเขียวเลื่อนทั่วทั้งพื้นผิว

ตารางที่ 1 แสดงการหาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว

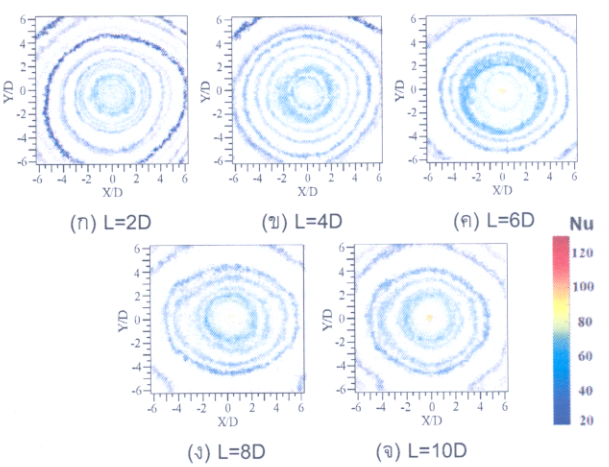
ลำดับที่	$\dot{q}$ $\left(\frac{W}{m^2}\right)$	h $\left(\frac{W}{m^2 \bullet {}^\circ C}\right)$	Nu	รูปหลังผ่านการประมวลภาพ
1	160	60	38	
2	175	65	41	
3	191	71	45	
4	207	77	48	
5	224	83	52	
6	242	90	57	
7	260	96	61	
8	280	103	65	
9	298	110	70	
10	318	118	75	
11	340	126	80	
12	360	134	85	



แสดงรูปที่นำค่านัสเซิลต์นัมเบอร์มาซ้อนกัน

สำหรับขั้นในการการวิเคราะห์ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 1 ลำดับแรกจะทำการตัดรูปที่ปรากฏเป็นแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์ (400 x 400 pixels) จากนั้นสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB) โดยใช้เงื่อนไขค่า r มีค่าใกล้เคียงกับค่า g ($|r-g| \leq 0.01$) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเส้นสีเขียวที่มีอุณหภูมิ T_w=30.2 °C และกำหนดให้คอมพิวเตอร์เลือกจุดสีที่มีเงื่อนไขข้างต้นแล้วแทนด้วยค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ตามที่แสดงในคอลัมน์ที่ 4 (ตารางที่ 1) สำหรับบริเวณที่แสดงเป็นจุดสีขาวคือส่วนที่ถูกแทนด้วยค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ จากนั้นจะทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวจากลำดับที่ 1–12 ตามที่ได้แสดงผลในตารางที่ 1 จากนี้ทุกๆเฟรมรูปจะแทนด้วยเมทริกซ์ของตัวเลขที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์กระจายอยู่ในพิกัดต่างๆเกือบทั่วพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ทั้งหมดมาซ้อนกันจากลำดับที่ 1-12 ตามที่ได้แสดงในรูปที่อยู่ด้านข้างของตารางที่ 1 (ที่อยู่นอกวงเล็บปีกกา)

สำหรับรูปสุดท้ายที่แสดงในคอลัมน์ที่ 5 บริเวณที่เป็นสีดำคือบริเวณที่จุดสีไม่ได้อยู่ในเงื่อนไขที่กำหนด โดยจะไม่แทนด้วยค่าใดๆ และถือว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์อยู่ระหว่างขอบเขตของเส้นสีขาวที่ล้อมรอบทั้งสองเส้น จากขั้นตอนข้างต้นก็จะได้นัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายเกือบทั่วทั้งพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนๆ ซึ่งผลการทดลองอาจจะแสดงให้อยู่ในรูปความเข้มของสี (Contour) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 7 หรืออาจจะแสดงที่พิกัดต่างๆตามแกน X หรือ Y ที่อยู่ในรูปกราฟความสูงของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามที่แสดงในรูปที่ 8

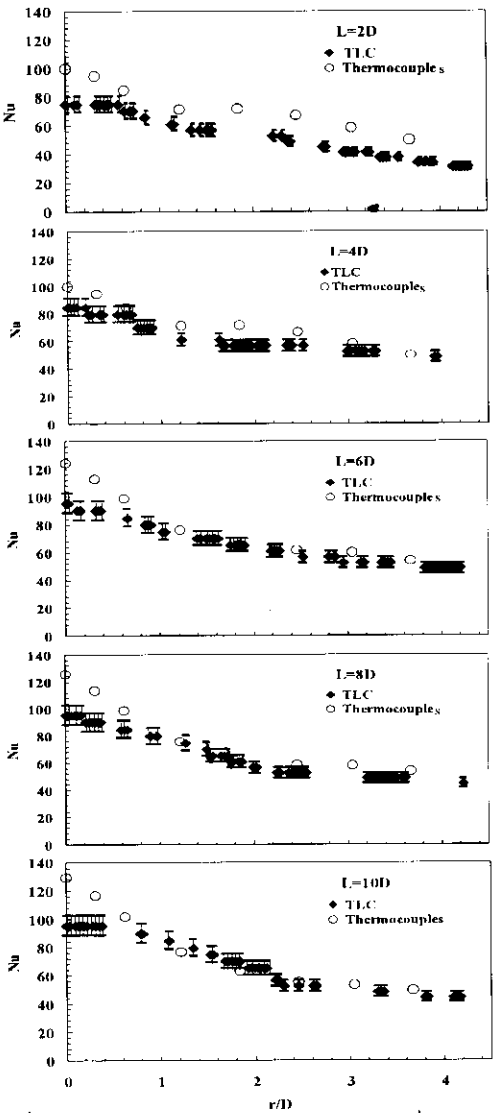


รูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ

5.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยวิธีการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยเทอร์โมคัปเปิล

ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้หัววัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลได้ใช้ชุดทดลองชุดเดิม โดยทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 8 หัว (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละเส้น 0.1 mm) บนพื้นผิวด้านหลังแผ่นสเตนเลส และปิดทับด้วยแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลบนหัววัดเทอร์โมคัปเปิล เพื่อให้อยู่ในสภาพที่ใกล้เคียงกับการใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิด

คริสตอลวัดอุณหภูมิบนพื้นผิว สำหรับค่านัสเซิลต์นัมเบอร์หาได้จากสมการที่ (1), (2) และ (3) ซึ่งในที่นี้ T_w คืออุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลในสภาวะคงตัว



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลและเทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลและเทอร์โมคัปเปิล จากการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยภาพรวมของทั้งสองวิธีพบว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ต่างๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน สำหรับที่ระยะ L= 2D สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าค่อนข้างสูงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามในกรณีที่เปรียบเทียบอย่างละเอียดจะพบว่าบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่อยู่ในช่วง X/D=0-0.4 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่วัดได้จากเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลทุกกรณี ซึ่งการใช้เทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลมีข้อจำกัดในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีพื้นที่แคบและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่อนข้างสูง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระบบการจับภาพที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลในการวัดการกระจายอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัด เหมาะสำหรับใช้ศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และในบทความได้นำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยวิธีสภาวะคงตัว โดยแสดงวิธีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการวิเคราะห์ภาพของการแสดงสีของสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล จากผลการศึกษาพบว่าสารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลสามารถแสดงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามการปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ นอกจากนี้ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้จากการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล จากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่วัดได้จากทั้งสองวิธีพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] มัทตาร์ และ ชยุต, "เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล" 2552, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หมายเลขบทความ TSF-008060.

[2] Stasiek, J., 1997, Thermochromic liquid crystals and true colour image processing in heat transfer and fluid-flow research, J. Heat and Mass Transfer, Springer-Verlag, Vol.33, pp. 27-39

[3] Ireland, P. T. and Jones, T. V., 2000, Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress, J. Measurement Science and Technology, Vol. 11. pp. 969-986.

[4] Baughn, J. W., 1995, Liquid crystal methods for studying turbulent heat transfer, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 16, pp. 365-375.

[5] Hoogendoorn, C. J., 1977. The effect of turbulence on heat transfer at a stagnation point, Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 20, pp. 1333 – 1338.

[6] Goldstein, R. J., Timmers, J. F., 1982, Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 25, pp. 1857 – 1868.

ภาคผนวก ฌ8

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8 22-23 เมษายน 2553 จังหวัดสงขลา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 732-737.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8
22-23 เมษายน 2553

การใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลในการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว

Measurement of Heat Transfer Coefficient on a Surface Using Thermochromic Liquid Crystal with Transient Technique

มักตาร์ แวหะยี ชยุต นันทดุสิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

Makatar Wae-hayee Chayut Nuntadusit
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: chayut@me.psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการทบทวนเอกสารการทำวิจัยเกี่ยวกับการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว สำหรับวิธีดังกล่าวได้ใช้หลักการการพาความร้อนบนพื้นผิวและเกิดการนำความร้อนในวัสดุที่เป็นแบบ Semi-infinite ใน 1มิติ สำหรับอุณหภูมิบนพื้นผิวได้จากการบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลตามระยะเวลา แล้วใช้วิธีการประมวลภาพด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว นอกจากนี้ได้นำเสนอตัวอย่างงานวิจัยที่นำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ทางด้านการถ่ายเทความร้อน เช่น การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตัวขวางการไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่มีฟิล์มเจ็ทไหลผ่าน เป็นต้น

คำหลัก เทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล, สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, วิธีสภาวะไม่คงตัว

Abstract

The objective of this article is to review of the measurement of heat transfer coefficient using Thermochromic Liquid Crystal with transient technique. The principle of this technique is to consider the convection on a surface and 1-D conduction in a semi-infinite medium. The temperature distribution on a surface was measured from capturing the color change of Thermochromic Liquid Crystal with time. Then, the results were analyzed by image processing for evaluation of heat transfer coefficient. This article also describes the examples in applying this technique for studying heat transfer phenomena, such as heat transfer on jet impingement surface, heat transfer on surface with some turbulators and heat transfer on surface with film jets.

Keywords: Thermochromic liquid crystal, Heat Transfer Coefficient, Transient Technique

1. บทนำ

วิธีการวัดอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวในปัจจุบันนิยมใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ประหยัดและสะดวกไม่ต้องการอุปกรณ์การวัดที่ซับซ้อน สามารถดูลักษณะการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวจากสีที่ปรากฏบนพื้นผิวด้วยตาเปล่า และในปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์บันทึกภาพ เช่น กล้องดิจิตอลที่สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง และมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพ ทำให้สามารถวัดการกระจายอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเชิงปริมาณได้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น [1, 2]

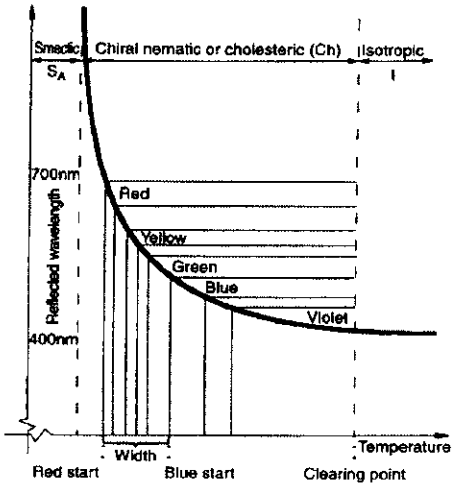
สำหรับวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลสามารถแบ่งได้ 2 วิธี ตามเงื่อนไขของกระบวนการวัดคือ วิธีแบบสภาวะคงตัว (Steady state) ที่ใช้หลักการการแสดงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวในสภาวะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแบบคงตัว และวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state หรือ Transient technique) เป็นวิธีที่ใช้หลักการวัดการ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลในสภาวะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [3, 4]

สำหรับบทความนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับหลักการการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลด้วยวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว และแนะนำตัวอย่างการนำไปใช้ในงานวิจัยทางด้านการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

2. หลักการการวัดอุณหภูมิด้วยสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลและการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์

สารเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอลเป็นสารประกอบจำพวกออแกนิคที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและของแข็งตามอุณหภูมิ ในขณะที่สารลิกควิดคริสตอลมีสถานะเป็นของแข็งเมื่อส่องสารนี้ด้วยแสงสีขาวจะพบว่าสารนี้จะมีลักษณะใสไม่มีสี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในสาร ทำให้แสงที่สะท้อนจากสารนี้จะเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงนี้จะเกิดซ้ำในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของสารนี้ [1, 2] ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดอุณหภูมิได้



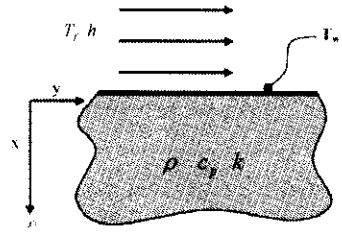
รูปที่ 1 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่น (สี) ของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง [2]

รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตอล เมื่อสารนี้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดหนึ่งคือ T_{rs} (rs: red start) จะเริ่มเปลี่ยนจากสารที่ใสไม่มีสีเป็นสีเทา และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เหลือง และเขียว ตามลำดับ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน เมื่ออุณหภูมิถึงอีกจุดหนึ่งคือ T_{bs} (bs: blue start) และหากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นอีกสีของสารจะเปลี่ยนเป็นสีใสไม่มีสีอีกครั้ง โดยทั่วไปสารเทอร์โมลิควิดคริสตอลจะมีหลายสูตร มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ T_{rs} ตั้งแต่ 30°C ถึง 120°C และช่วงความกว้างอุณหภูมิ (T_{bs}-T_{rs}) ตั้งแต่ 0.5°C ถึง 30°C ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต เนื่องจากสารนี้จะอยู่ในรูปของน้ำมันและคุณสมบัติทางอุณหภูมิของสารจะสูญเสียได้ง่ายถ้าถูกปนเปื้อนจากสารเคมีอื่นหรือเมื่อถูกแสงอุลตร้าไวโอเล็ต ดังนั้นในการผลิตสารนี้จะถูกบรรจุในแคปซูล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.005 mm ถึง 0.01 mm หรืออยู่ในรูปของของเหลวหรือโพลิเมอร์สำหรับทาบนผิว สามารถใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เช่น พื้นผิวโค้งหรือพื้นผิวไม่เรียบได้ตามต้องการ หรืออยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มพร้อมติด [1, 2]

ในการวิเคราะห์ภาพในอดีตมักจะใช้ระบบการวิเคราะห์ภาพแบบขาว-ดำ แต่ในปัจจุบันขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกภาพได้มีการพัฒนา ทำให้สามารถวิเคราะห์ภาพสีได้ง่ายขึ้น สำหรับการเก็บข้อมูลภาพสีของคอมพิวเตอร์จะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ ในหนึ่งเฟรมของรูปจะประกอบไปด้วย 3 เมทริกซ์ ตามจำนวนแม่สี (Red, Green, Blue) ซึ่งจะแทนด้วยจุดภาพ (Pixel) ของรูปเป็นตำแหน่งภายในเมทริกซ์ และความเข้มข้นของแม่สีจะแสดงเป็นระดับของตัวเลขในตำแหน่งของเมทริกซ์นั้นๆ [2]

ในการแสดงภาพสีของแต่ละเฟรมจะมีด้วยกันหลายๆระบบ แต่สำหรับระบบที่แสดงภาพสีทางจอคอมพิวเตอร์จะมีอยู่สองระบบหลัก คือ RGB และ HSV (หรือ HLS, HSI) ในการแสดงภาพสีของระบบ RGB จะเป็นการรวมกันของความเข้มของสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) ที่จุดภาพเดียวกัน แต่ในกรณีของระบบ HSV จะแสดงค่าสีหลัก (Hue) ค่าความบริสุทธิ์ของสี (Saturation) และความสว่างของสี (Value) ที่จุดภาพเดียวกัน อย่างไรก็ตามทั้งสองระบบสามารถแปลงจากระบบ RGB สู่ระบบ HSV และในทางกลับกันสามารถแปลงจากระบบ HSV สู่ระบบ RGB สำหรับการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์การแสดงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล ระบบ RGB จะใช้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแม่สีเทียบกับระดับของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ส่วนระบบ HSV จะใช้เฉพาะความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าสีหลักที่อุณหภูมิต่างๆเท่านั้น [5, 6]

3. หลักการการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 2 แสดงโมเดลของพื้นผิวที่ใช้วัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วยวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว [4]

สำหรับหลักการการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลด้วยวิธีแบบสภาวะไม่คงตัว จะต้องทำการสร้างโมเดลของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่

ทำให้เกิดการนำความร้อนในตัวกลางที่เป็นแบบ Semi-infinite ใน 1 มิติ ในทิศทางตามความลึกจากผิววัสดุ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุต้องมีความหนาเพียงพอและมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ จากคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้เกิดการนำความร้อนออกทางด้านข้างในเนื้อวัสดุมีค่าน้อยมาก

รูปที่ 2 แสดงโมเดลของพื้นผิวที่ใช้วัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ทำให้เกิดการนำความร้อนใน 1 มิติ ในทิศทางแกน x (ทิศทางที่ลึกลงไปในเนื้อวัสดุ) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูป

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (1)$$

โดยเงื่อนไขของค่าขอบเขต คือ

$$-k \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = h\left(T_w - T_f\right) \qquad \text{ที่ตำแหน่งผิว } x=0,\ t>0$$

$$T = T_i \qquad \text{ที่ตำแหน่ง } x \to \infty$$

และเงื่อนไขของค่าเริ่มต้น คือ

$$T = T_i \qquad \text{สำหรับ } t>0 \text{ ในช่วง } 0 \le x \le \infty$$

ในที่นี้ ρ, c_p และ k คือค่าความหนาแน่น, ความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนของโมเดลตามลำดับ, สำหรับค่า T_w, T_i และ T_f คือ อุณหภูมิบนผนังที่ระยะเวลาต่างๆ อุณหภูมิผนังเริ่มต้นและอุณหภูมิของของไหล โดยที่ t คือเวลาจากการเริ่มต้นพิจารณาการไหล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เวลาต่างๆ จากอุณหภูมิเริ่มต้นบนพื้นผิวที่ทราบค่า จะถูกบันทึกโดยการถ่ายภาพการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลตลอดช่วงระยะเวลาที่กำหนดของการทดลอง [7]

จากสมการที่ (1) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบนพื้นผิว T_w ที่เวลา t ใดๆ จะอยู่ในรูปของสมการ [4, 7]

$$\frac{T_w - T_i}{T_f - T_i} = 1 - e^{\beta^2} erfc\left(\beta\right) \qquad (2)$$

โดยที่ $\beta = h\left(t / \rho c_p k\right)^{0.5}$

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h จากสมการที่ (2) ในทางปฏิบัติค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะขึ้นอยู่กับเวลาและลักษณะโมเดลของงานวิจัย เช่น การถ่ายเทความร้อนแบบภายใน (Internal heat transfer) หรือการถ่ายเทความร้อนแบบภายนอก (External heat transfer) เป็นต้น

งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในการทดลองแต่ละครั้งอยู่ในช่วง 10-90 วินาที ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิของของไหลที่ไหลเข้าสู่ Test section ทำให้อุณหภูมิของของไหล T_f เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากสมการที่ (2) สามารถใช้ทฤษฎีของ Duhamel's superposition ทำการแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ที่กระจายบนพื้นผิว คำตอบของสมการที่ (2) จะอยู่ในรูปของ [7]

$$T_w - T_i = \sum_{j=1}^{N} \left\{ 1 - e^{\beta^{*2}} erfc\left(\beta^*\right) \right\} \left[\Delta T_{f(j,j-1)}\right] \qquad (3)$$

โดยที่ $\beta^* = h\left(\left(t - \tau_j\right) / \rho c_p k\right)^{0.5}$

สำหรับค่า $\Delta T_{f(j,j-1)}$ คือผลต่างอุณหภูมิของของไหลในช่วงเวลาต่างๆ และ τ_j คือระยะห่างของช่วงเวลา (Time step) โดยที่อุณหภูมิบนพื้นผิว T_w สามารถหาได้จากการแสดงสี (แทนด้วยค่าอุณหภูมิ) ที่เวลาต่างๆของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล จากนี้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ทุกจุดบนพื้นผิวที่ทำการทดลอง ซึ่งวิธีการแก้สมการดังกล่าวนี้สามารถใช้กับโมเดลของการถ่ายเทความร้อนทั้งแบบภายในและภายนอก

Baughn และ Yan [8] ได้ทำการแก้สมการที่ (2) ซึ่งสามารถใช้ได้เฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบภายนอก (ตัวอย่างในหัวข้อ 5.1) โดยใช้วิธีการให้ความร้อนพื้นผิวก่อนที่จะให้ของไหลไหลผ่านพื้นผิว (Preheated-wall transient method) ซึ่งสามารถจัดสมการที่ (2) อยู่ในรูปของ

$$T^* = \frac{T_w - T_f}{T_i - T_f} = e^{\beta^{**2}} erfc\left(\beta^{**}\right) \qquad (4)$$

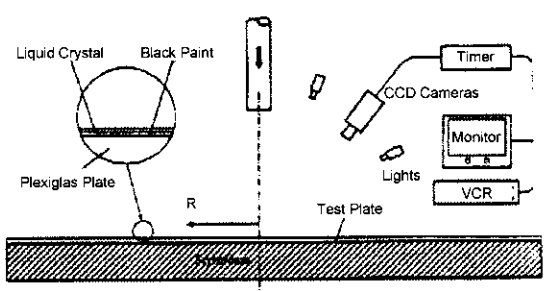
โดยที่ $\beta^{**} = h_t\left(t / \rho c_p k\right)^{0.5}$

สำหรับ h_t เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

5. ตัวอย่างงานวิจัย

จากนี้จะเป็นการนำเสนอตัวอย่างงานวิจัยที่หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว โดยแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของชุดทดลองสำหรับติดตั้งกลไกที่ใช้ในการบังคับกระแสการไหลของของไหล เพื่อไม่ให้สัมผัสกับพื้นผิวที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนก่อนที่จะทำการบันทึกภาพการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลตามระยะเวลาต่างๆ

5.1 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (jet impingement)



รูปที่ 3 แสดงชุดทดลองของ Baughn และ Yan [3]

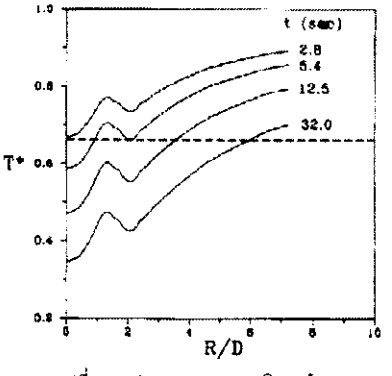
Baughn และ Yan [3] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชนด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว ในการทดลองได้ใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเคลือบบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อแสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวตามระยะเวลาต่างๆ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3 ก่อนการทดลองได้ใช้แผ่นทำบังกั้นกระแสการไหลของเจ็ทไม่ให้สัมผัสกับพื้นผิว และให้ความร้อนบนพื้นผิวจนอุณหภูมิคงที่ จากนั้นเมื่อควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของเจ็ทได้แล้วจึงนำ

แผ่นกำบังออกให้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว เริ่มจับเวลาและบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล

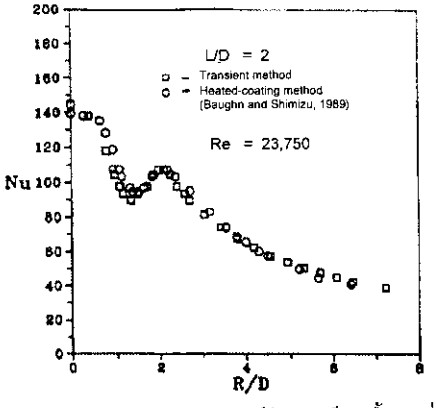
รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองค่า T^* จากสมการที่ (4) มีค่าลดลงทุก ๆ ตำแหน่งรัศมี R/D เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงทำการแก้สมการที่ (4) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แล้วนำไปหาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์โดยใช้สมการ

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

ในที่นี้ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ท และ k คือค่าการนำความร้อนของอากาศ



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (T^*) จากสมการที่ (4) บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะเวลาต่าง ๆ [3]

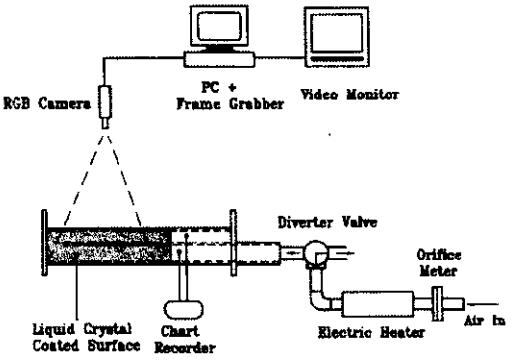


รูปที่ 5 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแกนรัศมี R/D และระยะพุ่งชน $L/D=2$ [3]

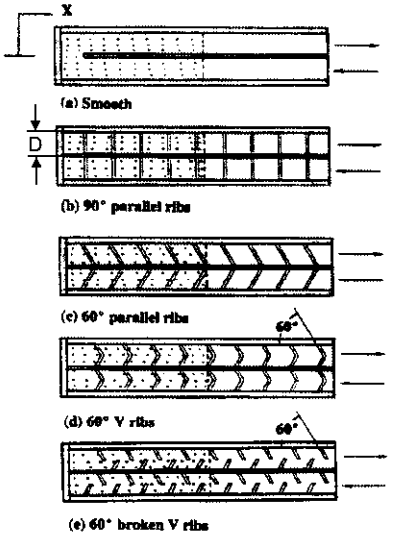
รูปที่ 5 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแกนรัศมี R/D ที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองแบบสภาวะคงตัวของ Baughn และ Shimizu [9] จากการเปรียบเทียบทั้งสองวิธี (วิธีสภาวะคงตัวและสถาวะไม่คงตัว) พบว่าผลการทดลองทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน

5.2 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตัวขวางการไหล

Ekkad และ Han [11] ได้ใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเคลือบบนพื้นผิวที่ติดตัวขวางการไหล (Ribs) เพื่อวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว สำหรับกลไกที่ใช้ในการบังคับกระแสการไหลของอากาศได้ใช้วาล์วปรับทิศทางการไหล (Diverter valve) ติดตั้งระหว่าง Test section และต้นกำเนิดกระแสการไหลของอากาศตามที่ได้แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงชุดทดลองของ Ekkad และ Han [10]



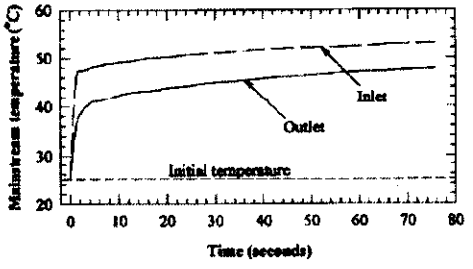
รูปที่ 7 แสดง Test section และตัวขวางการไหลในแต่ละแบบที่ใช้ในการทดลองของ Ekkad และ Han [10]

สำหรับตัวขวางการไหลและผนังด้านล่างของชุดทดลองทำจากแผ่นพลาสติกสีดำบนพื้นผิวผนังเคลือบสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล ในการทดลองได้ศึกษาลักษณะตัวขวางการไหล 4 แบบ (1) แบบขวางทำมุม 90° กับทิศทางการไหลของอากาศ (2) แบบขวางทำมุม 60° กับทิศทางการไหลของอากาศ (3) แบบตัว V ทำมุม 60° (3) แบบตัว V แยกทำมุม 60° และทดลองกรณีที่ผนังเรียบที่ไม่ติดตัวขวางการไหลตามที่แสดงในรูปที่ 7 โดยที่แกน +X แสดงทิศทางการไหลของทางออกอุโมงค์ลม และแกน -X แสดงทิศทางการไหลของทางเข้าอุโมงค์ลม สำหรับความสูงและระยะห่างระหว่างตัวขวางการไหลมีค่า e/D=0.125 และ P/e=10 ตามลำดับ โดยที่ D คือความกว้างของอุโมงค์ลมมีขนาด 5.08 cm

ในการทดลองได้ควบคุมอากาศให้มีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวที่เคลือบสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล โดยที่วาล์วปรับทิศทางการไหลของอากาศอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้อากาศไหลออกนอกชุด Test section จากนั้นจึงควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศให้

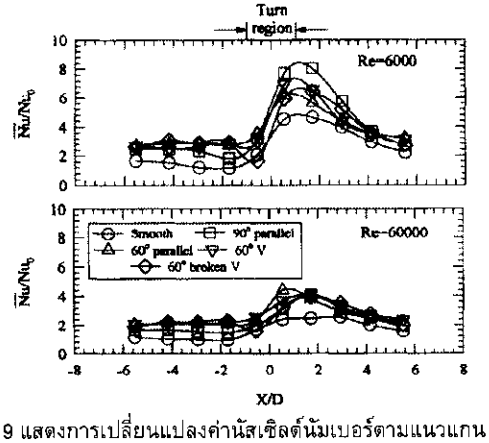
คงที่ แล้วจึงทำการเลื่อนตำแหน่งวาล์วปรับทิศทางการไหลของอากาศให้อากาศไหลเข้าสู่ Test section แล้วจึงเริ่มทำการจับเวลาบันทึกอุณหภูมิของอากาศและบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่เวลาต่างๆ โดยให้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลแสดงสีที่รู้อุณหภูมิ (สีเขียว) เลื่อนให้ทั่วทั้งพื้นผิว จึงหยุดทำการทดลอง

สำหรับอุณหภูมิของอากาศจะทำการวัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางของทางเข้าและทางออกอุโมงค์ลม แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย Ekkad และ Han [10] ได้แนะนำวิธีดังกล่าวจะได้ค่าอุณหภูมิของอากาศที่แม่นยำกว่าการวัดอุณหภูมิของอากาศเพียงแค่จุดเดียว รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิของอากาศบริเวณศูนย์กลางของทางเข้าและทางออกอุโมงค์ลมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากนั้นจึงทำการแก้สมการที่ (3) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่กระจายทั่วทั้งพื้นผิว



รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิของอากาศบริเวณศูนย์กลางของทางเข้าและทางออกอุโมงค์ลมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา [10]

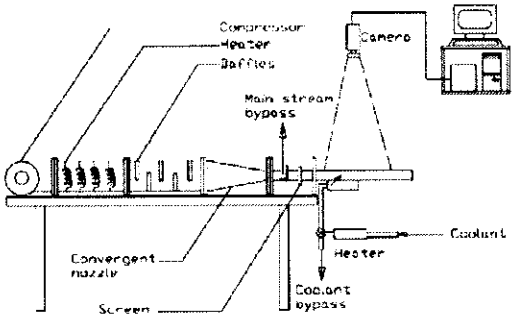
รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามแนวแกน X โดย $\overline{Nu}$ คือนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย และ Nu_0 คือค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของอุโมงค์ลมที่ไม่ติดตัวขวางการไหล โดยที่จุดของข้อมูลที่แสดงในรูปคือตำแหน่งของตัวขวางการไหลตามแนวแกน X/D บริเวณที่เป็นจุดกลับของอุโมงค์ลม (U-Turn) อยู่ในช่วง –1<X<1



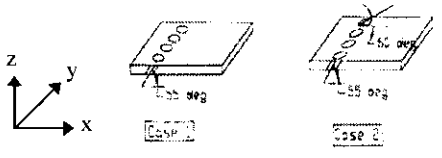
รูปที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ตามแนวแกน X/D [10]

5.3 การวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่มีฟิล์มเจ็ทไหลผ่าน

Nasir และคณะ [11] ได้ศึกษาผลของรูปแบบการฉีดฟิล์มเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณปากทางออกเจ็ท ในการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเคลือบบนพื้นผิว โดยทดลองด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว สำหรับกลไกที่ใช้ในการควบคุมให้อากาศไหลเข้าสู่ Test section ได้ติดตั้งวาล์ว 2 ชุด คือ วาล์วสำหรับปรับทิศทางการไหลของอากาศที่ไหลออกจากแถวของรูเจ็ท และวาล์วสำหรับปรับกระแสไหลหลักที่ไหลในช่องตามที่ได้แสดงในรูปที่ 9 สำหรับปากทางออกของเจ็ทที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบตามที่ได้แสดงในรูปที่ 10 แบบแรกรูของเจ็ทเอียงทำมุมกับแกน x ในแนวตั้ง 55° และแบบที่สองรูของเจ็ทเอียงทำมุมกับแกน x ในแนวตั้ง 55° และแนวนอน 60° สำหรับอัตราส่วนโมเมนตัมของเจ็ทเทียบกับกระแสหลักได้ทดลองที่เงื่อนไข M=0.5, 1.0, และ 1.5



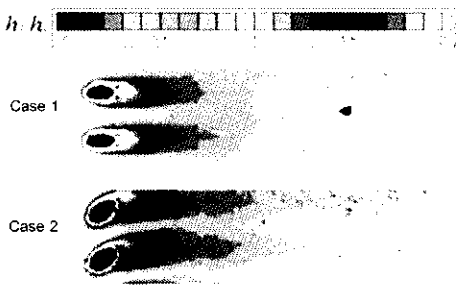
รูปที่ 9 แสดงชุดทดลองของ Nasir และคณะ [11]



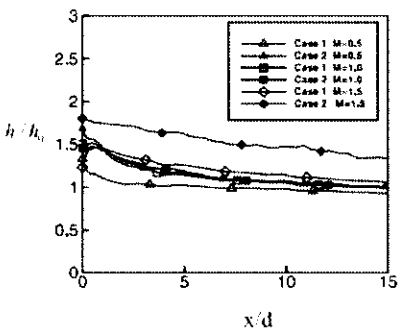
รูปที่ 10 แสดงรูปแบบปากทางออกเจ็ท [11]

ในการทดลองได้กำหนดให้วาล์วปรับทิศทางการไหลทั้งสองอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้อากาศที่ไหลบนพื้นผิวและอากาศที่ไหลออกจากรูเจ็ทไหลออกนอกชุด Test section จากนั้นกำหนดให้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศทั้งสองคงที่ โดยอากาศที่ไหลบนพื้นผิวมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศที่ไหลออกจากรูเจ็ท จากนั้นจึงปรับวาล์วให้อากาศทั้งสองไหลเข้าชุด Test section แล้วเริ่มทำการจับเวลา และบันทึกการเปลี่ยนสีของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลโดยกำหนดให้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลแสดงสีเขียว (35.4 °C) ทั่วทั้งแผ่นแล้วจึงหยุดทำการทดลอง จากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการประมวลภาพด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่กระจายบนพื้นผิว โดยรูปที่ 11 แสดงตัวอย่างการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว และรูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกรณีไม่มีฟิล์มเจ็ทตามแนวแกน x

Ekkad และคณะ [12] ได้แนะนำวิธีการแก้สมการที่ (2) ของกรณีดังกล่าวนี้ ซึ่งจะแตกต่างๆกับตัวอย่างงานวิจัยของสองกรณีแรก เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีอยู่สามตัวแปร คืออุณหภูมิของอากาศที่เริ่มต้นไหลบนพื้นผิว อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากรูเจ็ทและอุณหภูมิของอากาศบนพื้นผิว แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการในการแก้สมการจะเหมือนกัน



รูปที่ 11 แสดงการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ปากทางออกเจ็ท [11]



รูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ปากทางออกเจ็ทตามแนวแกน x [11]

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการใช้สารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state หรือ Transient technique) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบนพื้นผิวตามระยะเวลา โดยสร้างโมเดลของการทดลองให้ใกล้เคียงกับเงื่อนไขการนำความร้อนในวัสดุที่เป็นแบบ Semi-infinite ใน 1 มิติ สำหรับชุดทดลองได้ออกแบบให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของของไหลให้คงที่ก่อนเข้าสู่ Test section หลังจากที่ของไหลไหลตามพื้นผิวจึงทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของสี (อุณหภูมิ) ของสารเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล จากนั้นจึงใช้เทคนิคการประมวลภาพด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน

เอกสารอ้างอิง

[1] มักตาร์ และ ชยุต, "เทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตอล" 2552, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หมายเลขบทความ TSF-008060.

[2] Stasiek, J., Thermochromic liquid crystals and true colour image processing in heat transfer and fluid-flow research, 1997, J. Heat and Mass Transfer, Springer-Verlag, Vol.33, pp. 27-39.

[3] Baughn, J. W., Liquid crystal methods for studying turbulent heat transfer, 1995, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 16, pp.365-375.

[4] Esposito, E. I., Jet Impingement cooling configurations for gas turbine combustion, 2006, Thesis of Louisiana State University.

[5] Wang, Z., Ireland, P. T., Jones, T. V. and Davenport, R., A color image processing system for transient liquid crystal heat transfer experiments, 1996, J. Turbomachinery, Vol. 118. pp. 421-427.

[6] Ireland, P. T. and Jones, T. V., Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress, 2000, J. Measurement Science and Technology, Vol. 11. pp. 969-986.

[7] Ekkad, S. V. and Han, J.-C., A transient liquid crystal thermography technique for gas turbine heat transfer measurements 2000, J. Measurement Science and Technology, Vol. 11. pp. 957-968.

[8] Baughn, J. W. and Yah, X. 1991. A preheated-wall transient method for measurements of the heat transfer to an impinging jet. Eurotherm Seminar No. 25, pp. 1-7

[9] Baughn, J. W. and Shimizu, S. S., Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and a fully developed impinging jet, 1989. J. Heat Transfer, Vol.111, pp. 1096-1098.

[10 Ekkad, S. V. and Han, J.-C., Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators, 1997, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.40, No 11, pp. 2525-2537.

[11] Nasir, H., Ekkad, S. V. and Acharya, S., Effect of compound on flat surface film cooling with large streamwise injection angle, 2001, J. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 25, pp. 23-29.

[12] Ekkad, S. V., Zapata, D. and Han, J. C., Heat transfer coefficients over a flat surface with air CO2 injection through compound angle holes using a transient liquid crystal method, 1997, J. Turbomachinery , Vol. 119, pp. 508-586.

ภาคผนวก ฌ9

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

14th International Symposium on Flow Visualization June 21-24, 2010, EXCO Daegu, Korea.

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMENT

Chayut Nuntadusit*, Makatar Waehahyee*, Asi Bunyajitradulya, Toshihiko Shakouchi*****
*** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,**
Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand
**** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,**
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand
***** Graduate School of Engineering, Mie University, Tsu, Japan**

KEYWORDS:
Main subject(s): *Swirling jet, Jet impingement*
Fluid: *Air*
Visualization method(s): *Thermal liquid crystal, Oil film, Schlieren*
Other keywords: *Heat transfer enhancement*

ABSTRACT : *Heat transfer and flow characteristics of a swirl impinging jet were experimentally examined by using some visualization techniques. Swirl jet flow was generated by inserting twisted tape in pipe nozzle. The twisted pitch of twisted tape was changed to investigate swirl effects on heat transfer on the impinged surface and the effect of nozzle-to-plate was also investigated. The free jet flow was visualized by Schlieren technique. Thermochromic liquid crystal sheet was used for heat transfer visualization. The Oil film technique was used to reveal flow patterns on impinged surface .It was found that there appears two peaks of heat transfer rate in jet impingement region for jet from pipe inserted with twisted tape. The heat transfer enhancement can achieved in jet impingement region for case of swirl number Sw*=0.40 at all nozzle-to-plate distances.*

1 Introduction

Impinging jets have been widely used method for the heat transfer enhancement in a variety of industrial application such as cooling of turbine blades and electronic components, heating steel plates, tempering of glass and drying of papers and films [1]. It was also often used in rapid heating and cooling applications such as drying or freezing of food products. In this method, the jet flow impinges directly on the heat transfer surface and the high heat transfer rate is obtained in jet impingement region. However, the heat transfer rate decays in wall jet region due to the development of boundary layer on impinged surface [2]. To improve the uniformity of heat transfer on impinged surface, swirling jet flow has been used instead of non-swirling jet. Huang and El-Genk [3] used a swirl generator made of a cylindrical plug with four narrow channels inserted in pipe nozzle to provide swirl to air impinging jet. They found that the radial heat transfer distributions become more uniform than conventional impinging jet. Lee et al. [4] used some vane-type swirl generators to generate swirl impinging jet. To study the effect of swirling jet flow, the local heat transfer distribution was measured using thermochromic liquid crystal coated on the impinged surface. They found that the average Nusselt numbers are larger than non-swirling flow at small nozzle-to-plate distance for all swirl number, but the effect of swirling jet is rarely seen at large nozzle-to-plate distance. Wen and Jang [5] studied impinging jet cooling on a flat surface by using jet issuing through longitudinal swirling strips. The heat transfer and flow structure of impinging jet were investigated for two different inserts: longitudinal swirling-strip and crossed swirling-strip at different

ISFV14 - 14th International Symposium on Flow Visualization
June 21-24, 2010, EXCO Daegu, Korea

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR A SWIRLING JET IMPINGEMENT

Chayut Nuntadusit*, Makatar Waehahyee*, Asi Bunyajitradulya, Toshihiko Shakouchi*****
*** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,**
Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand
**** Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,**
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand
***** Graduate School of Engineering, Mie University, Tsu, Japan**

KEYWORDS:
Main subject(s): *Swirling jet, Jet impingement*
Fluid: *Air*
Visualization method(s): *Thermal liquid crystal, Oil film, Schlieren*
Other keywords: *Heat transfer enhancement*

ABSTRACT : *Heat transfer and flow characteristics of a swirl impinging jet were experimentally examined by using some visualization techniques. Swirl jet flow was generated by inserting twisted tape in pipe nozzle. The twisted pitch of twisted tape was changed to investigate swirl effects on heat transfer on the impinged surface and the effect of nozzle-to-plate was also investigated. The free jet flow was visualized by Schlieren technique. Thermochromic liquid crystal sheet was used for heat transfer visualization. The Oil film technique was used to reveal flow patterns on impinged surface .It was found that there appears two peaks of heat transfer rate in jet impingement region for jet from pipe inserted with twisted tape. The heat transfer enhancement can achieved in jet impingement region for case of swirl number Sw*=0.40 at all nozzle-to-plate distances.*

1 Introduction

Impinging jets have been widely used method for the heat transfer enhancement in a variety of industrial application such as cooling of turbine blades and electronic components, heating steel plates, tempering of glass and drying of papers and films [1]. It was also often used in rapid heating and cooling applications such as drying or freezing of food products. In this method, the jet flow impinges directly on the heat transfer surface and the high heat transfer rate is obtained in jet impingement region. However, the heat transfer rate decays in wall jet region due to the development of boundary layer on impinged surface [2]. To improve the uniformity of heat transfer on impinged surface, swirling jet flow has been used instead of non-swirling jet. Huang and El-Genk [3] used a swirl generator made of a cylindrical plug with four narrow channels inserted in pipe nozzle to provide swirl to air impinging jet. They found that the radial heat transfer distributions become more uniform than conventional impinging jet. Lee et al. [4] used some vane-type swirl generators to generate swirl impinging jet. To study the effect of swirling jet flow, the local heat transfer distribution was measured using thermochromic liquid crystal coated on the impinged surface. They found that the average Nusselt numbers are larger than non-swirling flow at small nozzle-to-plate distance for all swirl number, but the effect of swirling jet is rarely seen at large nozzle-to-plate distance. Wen and Jang [5] studied impinging jet cooling on a flat surface by using jet issuing through longitudinal swirling strips. The heat transfer and flow structure of impinging jet were investigated for two different inserts: longitudinal swirling-strip and crossed swirling-strip at different

nozzle-to-plate distances. The correlations of Nusselt numbers were provided for all nozzle types. However, there are a few studies for heat transfer characteristics with a swirling impinging jet. To understand the heat transfer enhancement mechanism, the heat transfer and flow visualization experiments are needed.
In this study, we used thermochromic liquid crystal sheet to investigate the effect of swirl number and nozzle-to-plate distance on heat transfer characteristics of an impinging jet from twisted tape inserted pipe nozzle. And we used flow visualization techniques to reveal the jet flow from pipe nozzle and flow on impinged surface. The experiments were carried out for the jet Reynolds number ($\mathrm{Re} = \rho \bar{V} D / \mu$, where $\bar{V}$ is the average velocity calculated from mass flow rate and D is the pipe nozzle diameter) of Re=20,000, nozzle-to-plate distance of L/D=2, 4, 6, 8, 10 and swirl number of Sw=0.40, 0.62, 0.78, 0.94.

2 Experimental Details

2.1 Experimental apparatus

The schematic of experimental setup is shown in Fig.1. Air jet is supplied by a centrifugal blower. The flow rate of jet flow is controlled by an inverter and is measured with calibrated orifice flow meter. The air from blower passes through a settling chamber before enters to pipe nozzle. The pipe nozzle has inner diameter of 16.5 mm and a length of 300 mm. Twisted tape is inserted in pipe nozzle for generating swirl flow. Electric heaters which controlled with temperature controller are installed in the settling chamber in order to obtain a constant and controllable temperature during experiment. The jet from pipe nozzle impinges normal to the flat wall and then flow between confined wall and jet impinged wall.

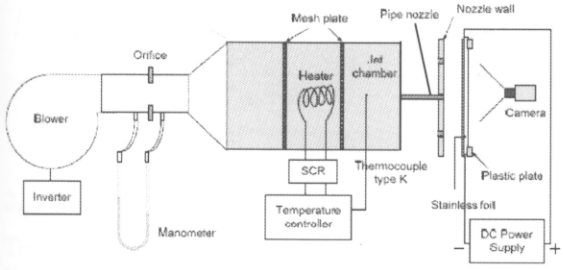


Fig. 1 Schematic of experimental setup

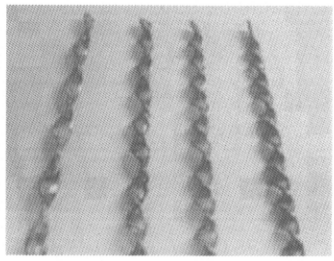


Fig. 2 Swirl generators with different twisted pitch number

The swirl jet flow is generated by inserting a twisted tape in the pipe nozzle. The twisted tapes are made of 2.5 mm thick stainless strips and are twisted in counter-clockwise. Fig. 2 shows the picture of twisted tapes used in this study. The length of twisted tape is 300 mm. The swirl intensity is varied by changing the number of pitches per twisted tape length. The swirl intensity is represented by swirl number which is defined as follow:

$$Sw = \frac{G_\theta}{RG_n} \tag{1}$$

where G_θ is the axial flux of azimuthal momentum, G_n is the axial flux of axial momentum and R is the radius of pipe nozzle. In this study, we ignore the effect of boundary layer in pipe nozzle and assume that the axial velocity and angular velocity are constant along the cross section of nozzle exit. So, G_θ and G_n can be expressed as follows:

$$G_n = 2\pi \int_0^R \rho V_n^2 r dr = \pi \rho V_n^2 R^2 \tag{2}$$

$$G_\theta = 2\pi \int_0^R \rho V_n V_\theta r^2 dr = \frac{\pi \rho V_n \omega R^4}{2} \quad (3)$$

where V_n, V_θ and ϖ are axial velocity, azimuthal velocity and angular velocity respectively. The angular velocity can be calculated from number of twisted pitch (n) and length of twisted tape (l=300mm) as follow

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \quad (4).$$

From Eq.(1)-(4), a modified swirl number is defined as follow

$$Sw^* = \frac{\pi n R}{l} \quad (5).$$

Table 1 shows the detail of the twisted tapes and modified swirl number (Sw*) for jet when using each twisted tapes. Twisted tape was placed inside the end of pipe nozzle as shown in Fig.3. Fig.3. also shows the coordinate system using in this study.

Table 1 Modified swirl number for each twisted tapes

Number of pitch (n)	Swirl number
0	0.00
5	0.40
8	0.62
10	0.78
12	0.94

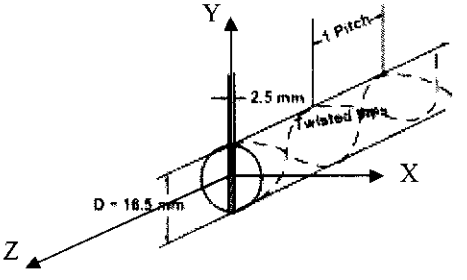


Fig. 3 Twisted tape inserted in pipe nozzle

2.3 Free jet flow visualization

To reveal the effect of swirl number on flow structure of free jet, the flow visualization was carried out using Schlieren technique. In the experiment, the air jet was heated up to 60°C and then issued to ambient at room temperature. The visualized flow pattern was recorded using a high speed digital video camera.

2.4 Heat transfer visualization and measurement

In this experiment, the electrical heated impinged target was cooled by jet issued from pipe nozzle. The target plate was made of stainless steel foil (SUS304) whose sizes were 250 mm x 250 mm and 0.03 mm thick. A liquid crystal sheet was attached with binder film onto the rear side of the impingement surface of stainless foil. The liquid crystal sheet used in this study changed the color systematically from black, red, yellow, green and blue between 29-36°C. Direct current was supplied to the stainless steel foil from a power supply unit via the copper bus bar electrodes, which were attached with both ends of stainless steel foil and acrylic plate as shown in Fig.3. So the boundary condition of uniform heat flux could be achieved on the target surface. The input power to the stainless steel foil was calculated from the power supply electric current and stainless steel foil resistance. Because, the stainless steel foil used in this study was sufficiently thin, the temperature on the target plate was obtained from the color pattern of the liquid crystal sheet in the rear side. When the temperature distribution on impinged surface (the color pattern of the liquid crystal sheet) reached steady state, the color pattern on liquid crystal sheet was recorded by a digital camera.

Since the lines of constant color on liquid crystal sheet corresponded to isotherms, an isotherm showed a line of constant heat transfer coefficient (Nusselt number) under a constant heat flux boundary condition. By changing the input current (heat flux) on target surface, the position of the isotherm was moved and the distribution of heat transfer coefficient could be measured by recording the position of yellow line (The calibration shows that this isotherm line was 30.2°C.) on the liquid crystal sheet for each change of heat flux. In this study, image processing technique was used to determine the heat transfer distribution from the isothermal line in images for each change of heat flux. All results are presented in the form of Nusselt number. The local convective heat transfer coefficient and local Nusselt number are calculated from

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_j} \tag{6}$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \tag{7}$$

where $\dot{q}$ is heat flux obtained by power input from power supply to impinged wall. T_j is jet temperature measured in settling chamber, T_w is wall temperature measured by tracing the yellow line color on liquid crystal sheet.

2.5 Wall flow visualization

In order to visualize the flow pattern on target plate, the oil film visualization technique was used in this experiment. A transparent acrylic plate was used as the target plate instead of stainless foil. The mixture of liquid paraffin, titanium dioxide and oleic acid was prepared and painted uniformly on the impinged surface. When the air jet started to impinge on the painted target plate, the oil film was removed by air jet. The change of oil film pattern was recorded by digital camera during exposed to impinging jet.

3 Results and Discussion

3.1 Free jet flow visualization

Fig.4 shows the effect of swirl number on free jet flow patterns observed by using Schlieren visualization technique. The experiments were conducted at constant Re=1.85×10^4 and T_j=60°C. In this figure, the flow patterns visualized from Y-Z plane and Z-X plane are also shown. For all of free jets, there appears no flow region (black region in figures) near pipe exit in Z-X plane due to the edge of twisted tape. And there appears strong twisted flow region between two flow streams from nozzle exit in Y–Z plane. From the results, it is found that the jet spreading rate in jet radial direction tends to increase with increase of swirl number.

3.2 Heat transfer and flow visualization on impinged surface

Fig. 5 shows example of heat transfer patterns on impinged surface visualized by using thermochromic liquid crystal sheet for swirling jet of Sw*=0.62 at L=2D. The lower temperature region appeared on liquid crystal sheet means the higher heat transfer region. In the experiment, the jet at room temperature impinged on the heated wall. The heat flux on impinged wall was varied in order to investigate heat transfer patterns on high and low heat transfer rate regions on impinged surface. At small heat flux condition, the heat transfer pattern in wall jet flow region was visualized. And the heat transfer pattern in jet impingement region was visualized when increased the heat flux on impinged wall. For impinging jet with swirl effect, it is found that there have two peaks of heat transfer near the impinging point. This is due to the flow from pipe with twisted tape divided into two stream flows at nozzle exit and then swirl around the jet axis before impinging obliquely on the surface. It can be seen the heat transfer enhancement due to two of stream flows impinging oblique to the surface.

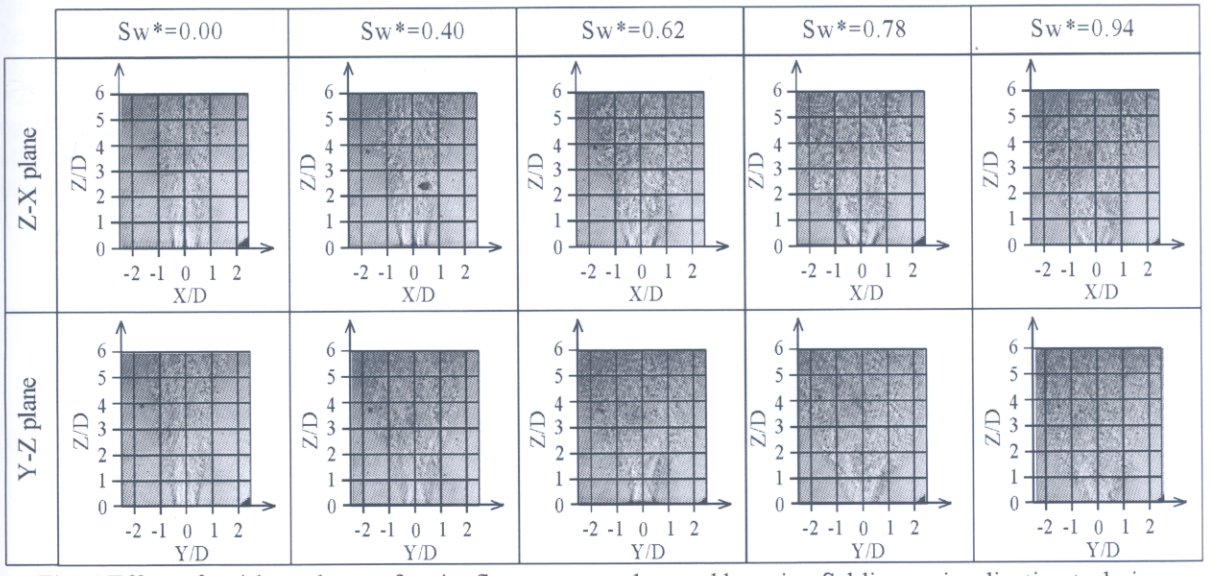


Fig. 4 Effect of swirl number on free jet flow patterns observed by using Schlieren visualization technique ($Re=1.85x10^4$, T_j=60°C)

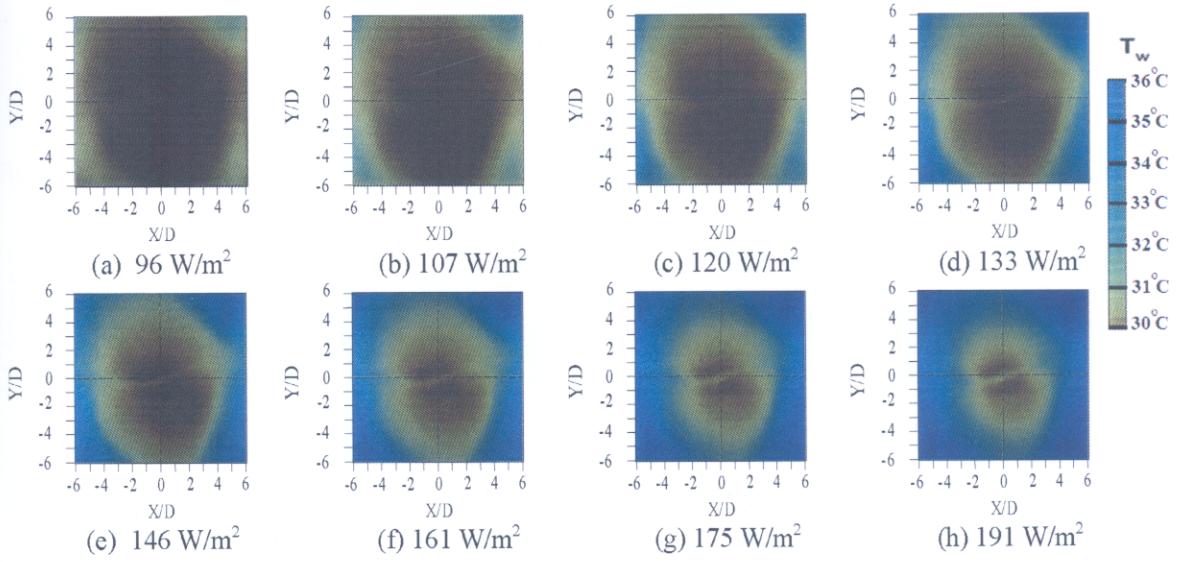


Fig. 5 Visualization of heat transfer on impinged surface for swirling jet of Sw*=0.62 at L=2D (T_j=28.5°C, Re=20,000)

Fig,6 shows time sequence of oil film patterns on impinged surface after jet impingement for swirling jet of Sw*=0.62 at L=2D. The oil film pattern in Fig.6(a) shows that there are two streams of flow impinging on the wall. After that oil film on surface is removed by strong wall shear flow and there appear two of black regions (no oil film region) apart from center of jet. These regions correspond to jet impingement region. The remains of white oil in each of jet impingement regions correspond to the stagnation region. Around jet impingement

regions, there is wall jet region where the white oil is removed partly and appear black-white region in figure. The wall jet region can be detected only in region behind the jet impingement region.

Fig. 7 and Fig.8 show the effect of swirl number on heat transfer and wall flow patterns on impinged surface for L=2D (Re=20,000), respectively. These figures also show the results of conventional impinging jet from pipe nozzle without twisted tape for comparison. The heat transfer patterns in Fig. 7 correspond to the wall flow patterns in Fig.8. It is found that the distance between two peaks of heat transfer increases with increase in swirl number.

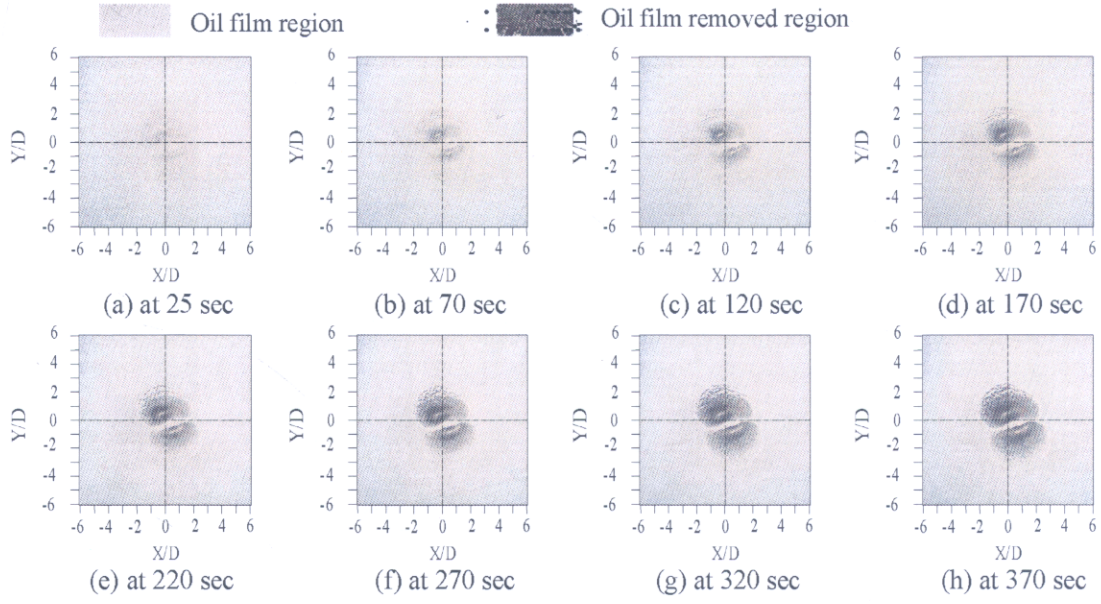


Fig. 6 Time sequence of oil film patterns on impinged surface after jet impingement for swirling jet of Sw*=0.62 at L=2D (Re=20,000)

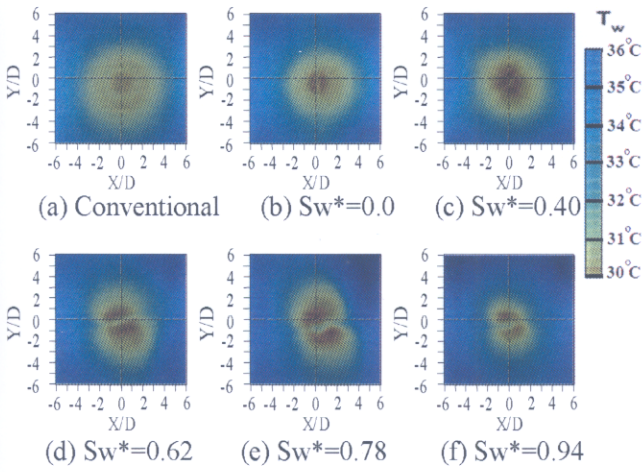


Fig. 7 Effect of swirl number on heat transfer patterns on impinged surface for L=2D (Re=20,000)

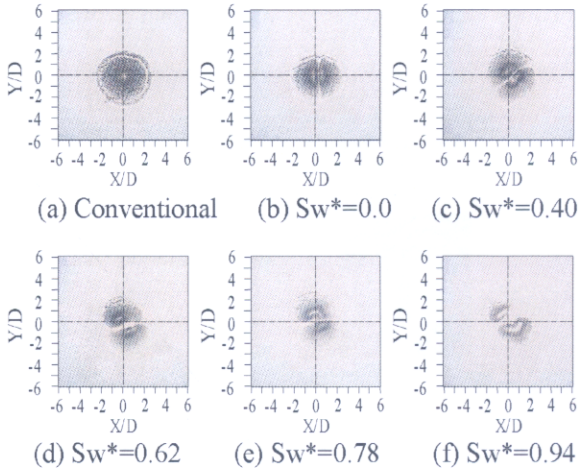


Fig. 8 Effect of swirl number on wall flow patterns on impinged surface for L=2D (Re=20,000)

3.3 Local Nusselt number on impinged surface

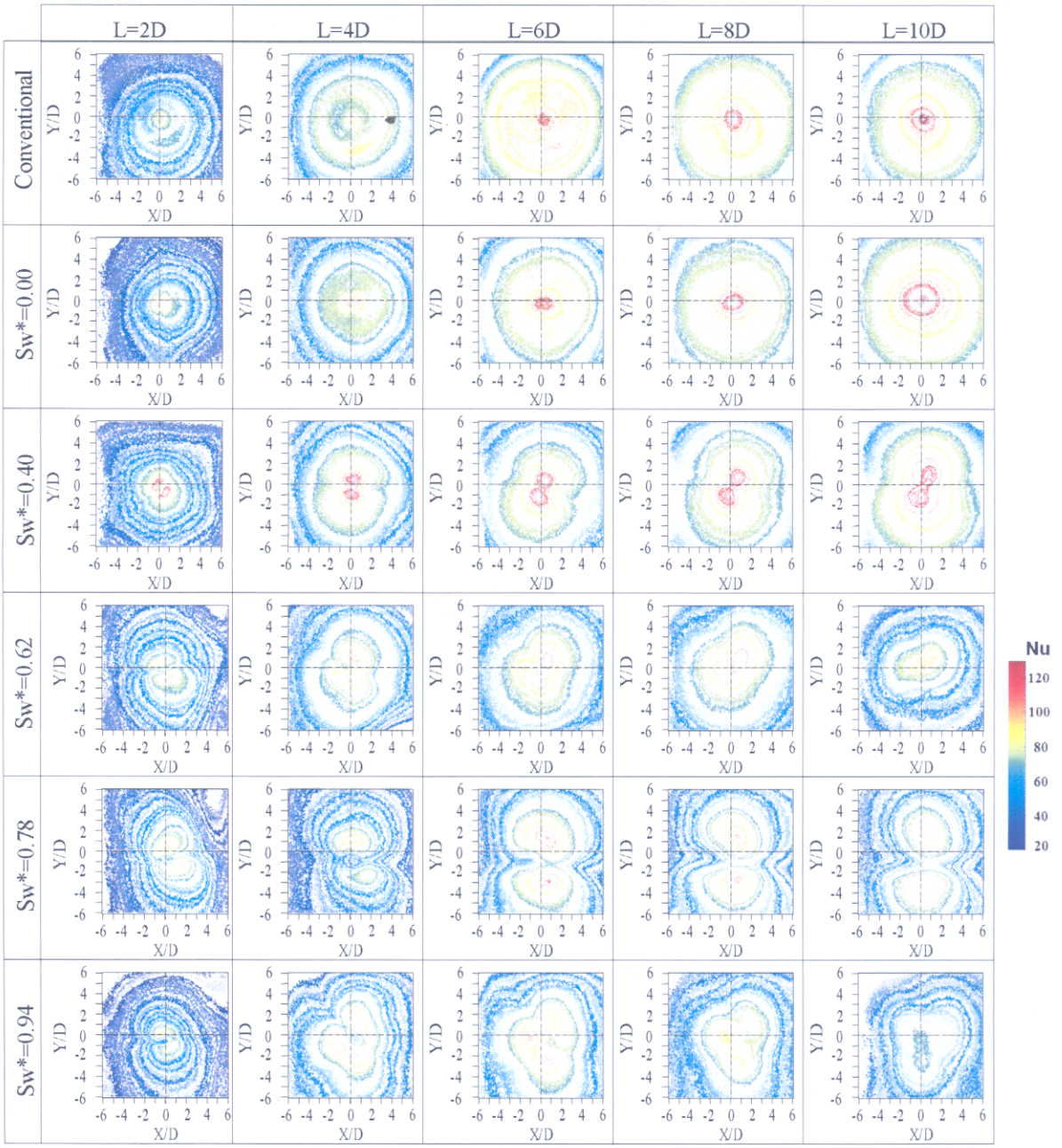


Fig. 9 Effect of Swirl number and nozzle-to-plate distance on contour of Nusselt number (Re=20,000)

Fig. 9 shows the effect of swirl number on local Nusselt number at different nozzle-to-plate distances. For conventional impinging jet (no twisted tape inserted in pipe nozzle), the Nusselt number becomes maximum at the center of pipe nozzle location on impinged surface for all L. The patterns of local Nusselt number are

symmetry and the Nusselt number decreases from maximum point as going far from stagnation point. And at L=4D, there appears the secondary maximum heat transfer at radial location R=3D from stagnation point. The heat transfer rate increases with the increase of L. It may due to the turbulence intensity of jet at nozzle exit is low, and when the nozzle-to-plate distance increase, the turbulence of jet increases before impinging on the surface.

For swirling jet of Sw*=0.0 case, the flow from pipe is divided to two of jets by tape with no twist inserted in pipe nozzle. At small L=2D and 4D, it appears two peaks of Nusselt number in stagnation region. But, the two of jets combine before impinging on the surface at larger L, the heat transfer pattern becomes similar to the case of conventional impinging jet.

For swirling jet of Sw*=0.40 case, there appears two peaks of Nusselt number in the impingement region for all L. The heat transfer patterns in jet impingement region and wall jet region are affected by swirl effect. It is clear that the heat transfer is enhanced in jet impingement region, when compared with conventional impinging jet. However, there is no heat transfer enhancement in wall jet region.

For swirling jet of Sw*=0.62, there also appears two peaks of Nusselt number in the impingement region, but the peak of Nusselt number becomes smaller when compared with case of Sw*=0.40 for all case of L. The heat transfer rate on all region deceases when compared with conventional impinging jet. This is due to the swirl effect induced strong mixing between the jet and ambient air before impinging.

For swirling jet of Sw*=0.78, the distance between two peaks of Nusselt number increased and the impingement region is divided into two regions clearly. The heat transfer is enhanced in wall jet region when compare with case of Sw*=0.62 for case of L=6D, 8D and 10D.

For swirling jet of Sw*=0.94, the heat transfer patterns become more complex in jet impingement region. However, the heat transfer enhancement can be seen in jet impingement region when compared with conventional impinging jet for case of L=2D and 4D.

4 Conclusions

In this work, the effect of swirl number on free jet flow and heat transfer characteristics of an impinging jet was investigated at different nozzle-to-plate distances. The main results obtained in these experiments are as follows:

(1) The jet from pipe nozzle with twisted tape is divided into two streams of flow and then flow across with an angle depends on the flow out angle from twisted tape. The number of twisted pitch affects to the swirl number of jet and flow out angle from twisted tape. The increase of swirl number of free jet promotes the jet spreading in radial direction.

(2) The heat transfer patterns appear two peaks of heat transfer in jet impingement region due to two of stream flows from pipe nozzle impinged obliquely to the impinged surface. The heat transfer enhancement can be obtained in jet impingement region for case of Sw*=0.40 at all L.

(3) When the swirl number is increased larger than Sw*=0.40, the heat transfer rate in jet impingement region deceased, but the heat transfer distributions on impinged surface become more uniform than in the case of conventional impinging jet.

Acknowledgements

The authors are grateful for the support of this research by Thailand Research Fund (TRF) through Grant No. MRG4980085.

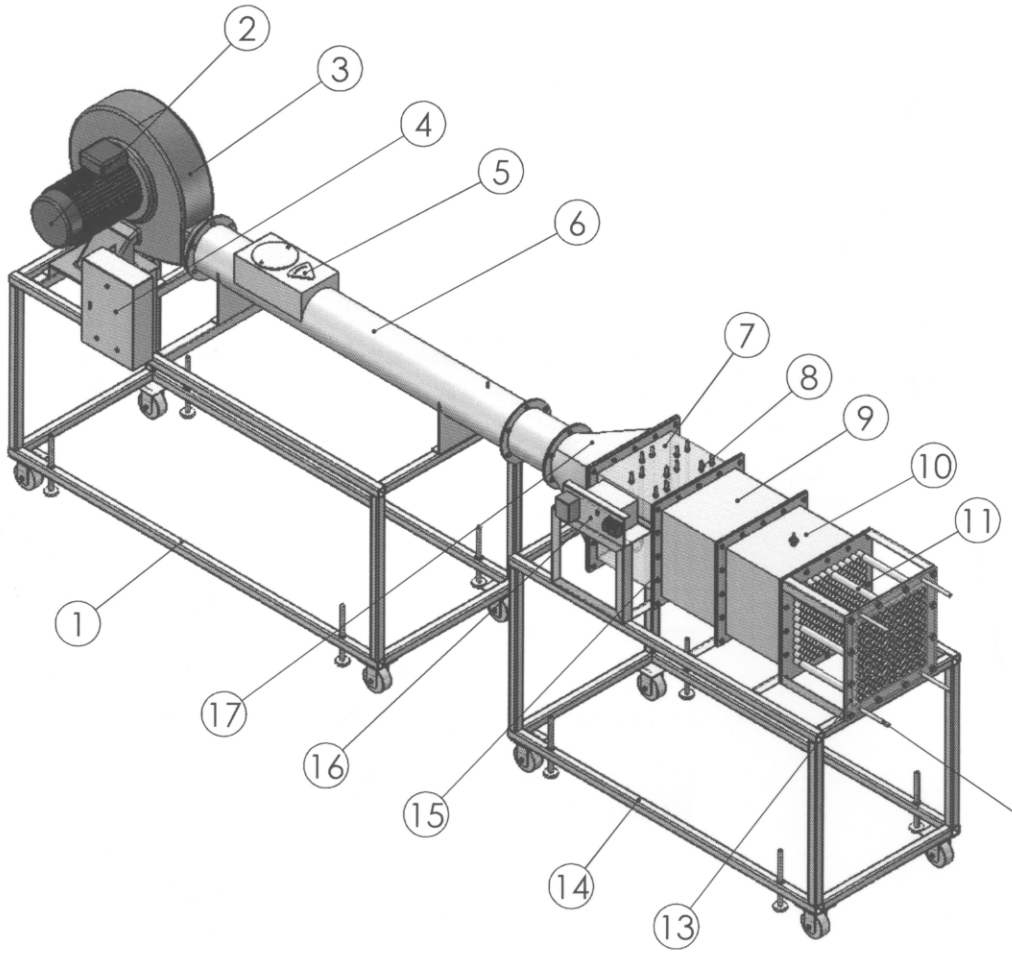
References

1. H. Martin. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, Academic Press, New York, pp 1-60, 1977

2. R. Viskanta. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 6, pp 111-134, 1993
3. L. Huang, M.S. El-Genk. Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp 583-600, 1997.
4. D. H. Lee, S.Y. Won, Y.T. Kim, Y.S. Chung. Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet. *Int. J. Heat Mass Tranfer*, Vol. 45, pp 223-227, 2002.
5. M.-Y. Wen, K.-J. Jang. An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp 4657-4667, 2003.
6. K. Bakirci, K. Bilen. Visualization of heat transfer for impinging swirl flow. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 32, pp 182-191, 2007

ภาคผนวก ญ

แบบชุดทดลอง



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	ฐานรองโบลเวอร์	See Sheet No.2	1
2	มอเตอร์	See Sheet No.2	1
3	โบลเวอร์	See Sheet No.2	1
4	กล่องควบคุม	See Sheet No.2	1
5	วาล์วปีกผีเสื้อ	See Sheet No.2	1
5	ท่อต่อกับโบลเวอร์และชุดทดสอบ	See Sheet No.2	1
6	ชุดทดสอบช่วงที่ 1	See Sheet No.3	1
7	ฮีทเตอร์	See Sheet No.3	6
9	ชุดทดสอบช่วงที่ 2	See Sheet No.3	1
10	ชุดทดสอบช่วงที่ 3	See Sheet No.3	1
11	ชุดท่อทดสอบ	See Sheet No.3	9
12	เหล็กแท่งต่อจากแผ่นเพลท	See Sheet No.3	4
13	แผ่นพลาสติกใส	See Sheet No.3	1
14	ฐานรองชุดทดสอบ	See Sheet No.3	1
15	แผ่นกรอง	See Sheet No.3	4
16	แผงควบคุมชุดทดสอบ	See Sheet No.3	1
17	อุปกรณ์แปลงหน้าตัด	See Sheet No.3	1

	NAME	DATE
DRAWN	By S.E.D Team	09/7/2550
CHK'D	By S.E.D Team	10/7/2550
APPV'D	Dr. Chayut Nuntadusit	12/7/2550
Q.A		

PRODUCT NAME: ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงบนผนัง

PROJECT NAME: ทุนวจัย ส.ก.ว.

REMARK :

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

CODE NO.

PROJECTION

SIZE A4

REVISION 0

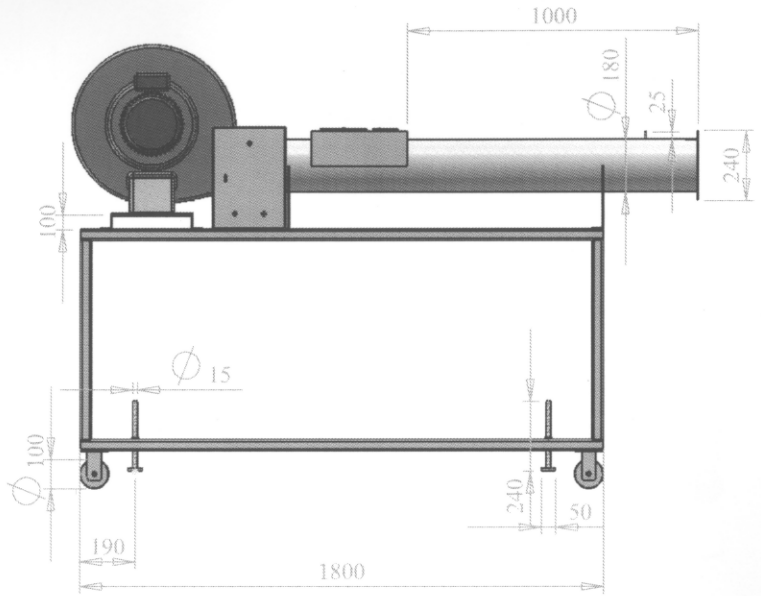
MATERIAL :Mild Steel

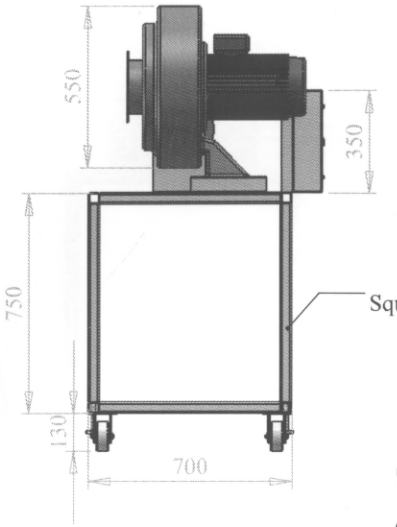
UNIT: Millimeter

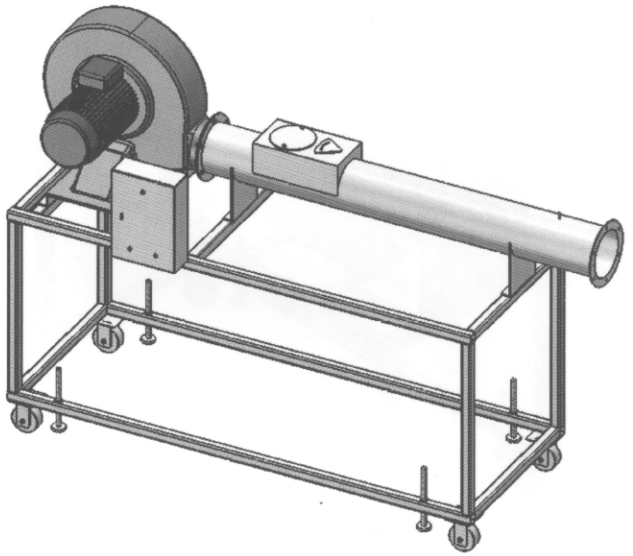
Folder : D:\งานย.ชุดทดสอบ\Drawing+PDF\

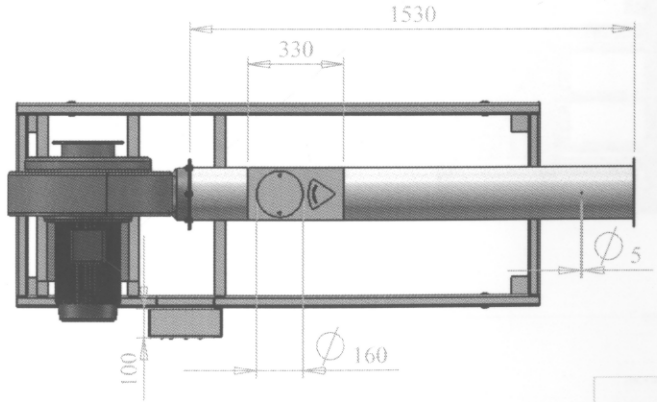
SCALE:1:25

SHEET 1 OF 3









	NAME	DATE
DRAWN	By S.E.D Team	09/7/2550
CHK'D	By S.E.D Team	10/7/2550
APPV'D	Dr. Chayut Nuntadusit	12/7/2550
Q.A		

PRODUCT NAME:ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงบนผนัง

PROJECT NAME: ทุนวิจัยส.ก.ว.

REMARK :

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

MATERIAL :Mild Steel	UNIT: Millimeter	Folder : D:\งานย.ชุดทดสอบ\Drawing+PDF\

CODE NO.

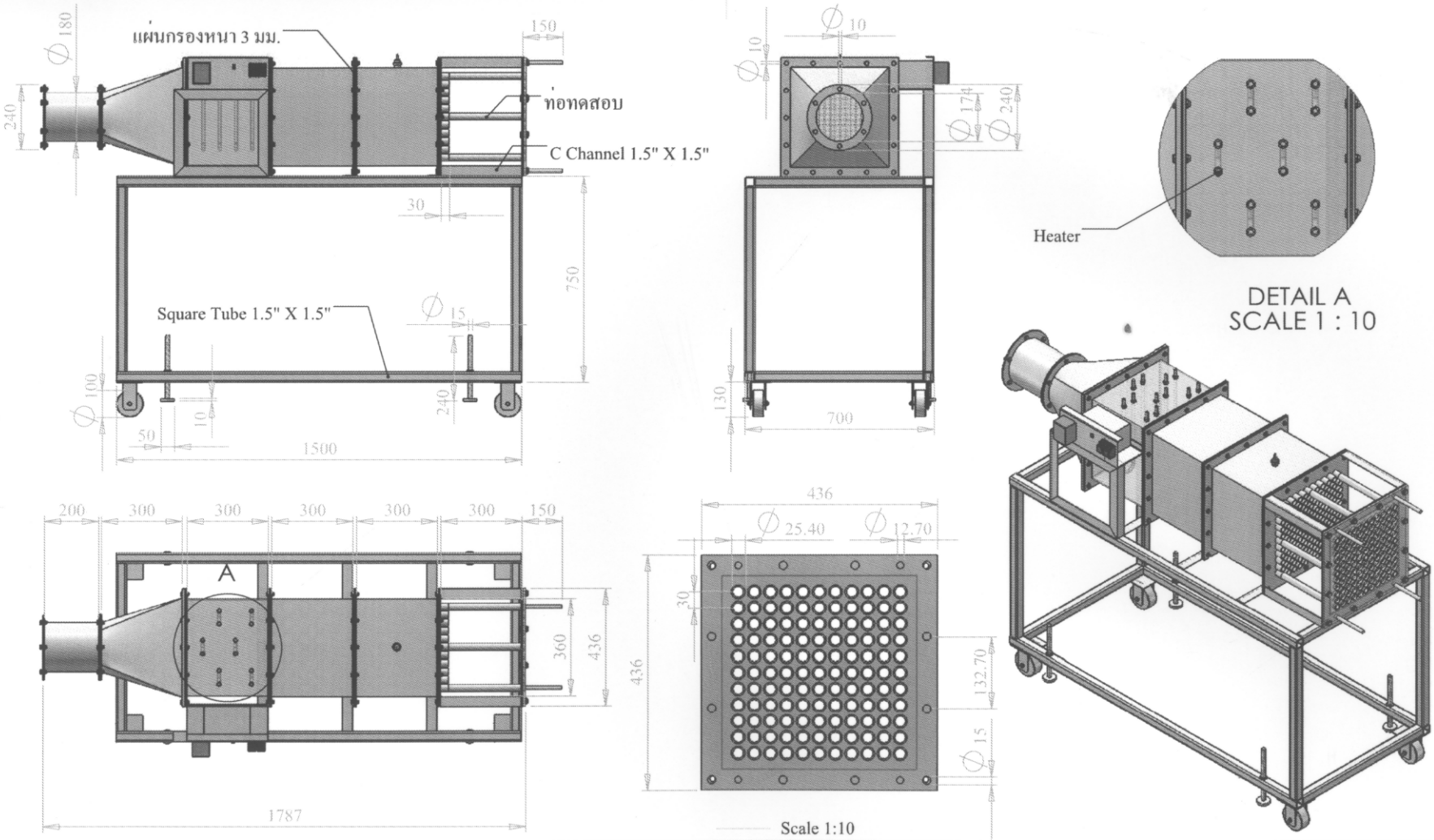
PROJECTION

SIZE A4

REVISION 0

SCALE:1:25

SHEET 3 OF 3



	NAME	DATE
DRAWN	By S.E.D Team	09/7/2550
CHK'D	By S.E.D Team	10/7/2550
APPV'D	Dr. Chayut Nuntadusit	12/7/2550
Q.A		

PRODUCT NAME:ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงบนผนัง

PROJECT NAME: ทุนวิจัย ส.ก.ว.

REMARK :

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

CODE NO.

PROJECTION

SIZE A4

REVISION 0

MATERIAL :Mild Steel

UNIT: Millimeter

Folder : D:\งานอ.ชุดทด\Drawing+PDF\

SCALE:1:20

SHEET 2 OF 3