



การใช้เจ็ทหมุนควงในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว
Heat Transfer Enhancement on a Surface Using Some Swirling Jets

มักตาร์ แวะหะยี

Makatar Wae-hayee

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์	การใช้เจ็ทหมุนควงในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว
ผู้เขียน	นายมัคคาร์ เวหะยิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของระดับการหมุนควงของเจ็ทที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มของเจ็ทพุ่งชน ในการทดลองได้ใช้หัวฉีดแบบท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D=16.5$ mm และใช้แผ่นบิตที่มีอัตราส่วนการบิดต่างๆสอดในท่อเจ็ทเพื่อสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง 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 $Re=20,000$ สำหรับการศึกษากการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลวัดการกระจายของอุณหภูมิและหาการกระจายของนัสเซิลนัมเบอร์บนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน นอกจากนี้ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลโดยใช้วิธีฉีดสีผสมในเจ็ทน้ำ เพื่อดูโครงสร้างการไหลของเจ็ทหมุนควงและอธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชน

จากผลการศึกษาพบว่า เจ็ทหมุนควงที่ไหลออกจากท่อสอดแผ่นบิตจะแบ่งกระแสการไหลออกเป็นสองลำไหลเอียงทำมุมกับแกนของเจ็ท การเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทจะมีผลทำให้มุมของกระแสทั้งสองลำที่ไหลทำมุมกับแนวแกนของเจ็ทเพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่กระจายของเจ็ทและการผสมกันระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆเพิ่มขึ้น และเมื่อเจ็ทหมุนควงไหลพุ่งชนพื้นผิวแล้ว จะทำให้เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และพบว่าเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ $Sw=0.40$ สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงได้ โดยเฉพาะระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D$ แต่การเพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทและระยะจากปากทางออกของเจ็ท

ถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดลง และมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ซับซ้อน 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

Thesis Title	Heat Transfer Enhancement on a Surface Using Some Swirling Jets
Author	Mr. Makatar Wae-hayee
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2008

ABSTRACT

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.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.ชยุต นันทคุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสนอแนวทางการทำวิจัยและเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ปัญญรักษ์ งามศรีตระกูล ดร.พุทธิพงษ์ แสนสบาย และรองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการเล่าเรียน ขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุเคราะห์ทุนค่าเล่าเรียน

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 การตรวจเอกสาร	4
1.2.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจีทพุ่งชน	4
1.2.2 งานวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจีทพุ่งชนพื้นผิว	7
1.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้กลุ่มของเจีทพุ่งชนพื้นผิว	9
1.2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เจีทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว	11
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	16
2.1 โครงสร้างการไหลของเจีทอิสระ	16
2.2 โครงสร้างการไหลของเจีทพุ่งชน	17
2.3 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจีทบนพื้นผิว	18
2.3.1 ระยะจากปากทางออกของเจีทถึงพื้นผิวที่เจีทพุ่งชน	18
2.3.2 ชนิดของหัวฉีด	20
2.4 โครงสร้างการไหลของกลุ่มของเจีทพุ่งชน	21
2.5 เจีทหมุนควง	22
2.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของเจีทหมุนควง	22
2.5.2 ตัวกำเนิดกระแสเจีทหมุนควง	23
	(8)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สมการพื้นฐานที่ใช้ในคำนวณการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน	26
บทที่ 3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย	28
3.1 วิธีการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง	28
3.2 รายละเอียดของชุดทดลอง	30
3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	32
3.3.1 ชุดทดลอง	32
3.3.2 วิธีการทดลอง	34
3.3.3 การสอบเทียบสปีดของแผ่นเทอร์โมลิวคิวิตคริสตัล	36
3.3.4 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	40
3.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว	42
3.4.1 ชุดทดลอง	42
3.4.2 วิธีการทดลอง	42
3.5 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทฤษฎี	43
3.6 การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง	47
4.1 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว	47
4.1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระ	47
4.1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิว	49
4.1.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ	52
4.1.4 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศลำเดียว	54
4.1.5 ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ	59
4.1.6 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่เป็นเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำ	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การกระจายของน้ำเซลล์น้ำมันเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศลำเดี่ยวพุ่งชน	63
4.2.1 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่อการกระจายของน้ำเซลล์น้ำมันเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า	64
4.2.2 ผลของสเปิร์ลน้ำมันเบอร์ที่มีต่อการกระจายของน้ำเซลล์น้ำมันเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดี่ยว	66
4.3 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	71
4.4 ผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ที่มีต่อการกระจายของน้ำเซลล์น้ำมันเบอร์บนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	76
4.5 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีผลต่อการกระจายของน้ำเซลล์น้ำมันเบอร์บนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	85
5.1 สรุปผลการทดลอง	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
บรรณานุกรม	88
ภาพผนวก	91
ก ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน	91
ข ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	94
ค ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	102
ง ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว	104
จ ผลการศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว	107
ฉ ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ	110
ช โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	112
ประวัติผู้เขียน	116
	(10)

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงจำนวนเกลียวที่ความยาวของแผ่นบิด 300 mm สวิร์ลนัมเบอร์และอัตราส่วนการบิดของแต่ละแผ่นบิด	30
3.2 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ภาพแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	40
3.4 แสดงตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ	43

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงการติดครีป (Fin) ลงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	2
1.2	แสดงชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว	2
1.3	แสดงลักษณะการไหลผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนด้วยวิธีการติดครีปและฟิน	3
1.4	แสดงวิธีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน	4
1.5	การระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,533,864)	5
1.6	การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 6,000,908)	5
1.7	การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,329,994)	6
1.8	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและโครงสร้างภายใน (สิทธิบัตรลำดับที่ US 4,494,171)	6
1.9	แสดงการเปรียบเทียบการจำกัดบริเวณการไหลโดยการติดตั้งผนังด้านหัวฉีด	7
1.10	แสดงลักษณะหัวฉีดและชุดทดลองของ Colucci และ Viskanta	8
1.11	แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทและชุดทดลองของ San และ Lai	9
1.12	แสดงลักษณะผนังด้านหัวฉีดที่ใช้สำหรับการทดลองของ Rhee และคณะ	10
1.13	ลักษณะของตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงและชุดทดลองของ Huang และ El-Genk	12
1.14	ลักษณะของตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงและชุดทดลองของ Lee และคณะ	13
1.15	ลักษณะตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงของ Bakirci และ Bilen	14
2.1	โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	16
2.2	โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ	18
2.3	การกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ (กรณีที่ใช้หัวฉีดแบบท่อและ $Re=23,750$)	19
2.4	แสดงคุณสมบัติการกระจายความเร็วและการกระจายความปั่นป่วนที่ปากทางออกหัวฉีดแต่ละแบบ	20
2.5	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกลุ่มของเจ็ท	21
2.6	โครงสร้างการไหลแบบเกือกม้าที่เกิดจากกระแสลมไหลตัดผ่านลำเจ็ทที่กระทบผนัง	22
2.7	การหมุนท่อเจ็ท	24
2.8	แผ่นบิดที่ใช้สอดในท่อเจ็ท	24
2.9	ลักษณะใบพัดบังคับทิศทางติดที่ปากทางออกของเจ็ท	25
2.10	แท่งเฮลิคอลล (Helical) ที่สอดในท่อเจ็ท	25

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	แสดงตัวอย่างแผ่นบีดที่สร้างขึ้นและลักษณะการสอดแผ่นบีดในท่อเจ็ท	28
3.2	แสดงรายละเอียดของชุดทดลอง	31
3.3	แสดงภาพถ่ายของชุดทดลอง	31
3.4	แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	33
3.5	แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิวอิคคริสตัล	35
3.6	แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวอิคคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ	37
3.7	แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสี rgb จากแผ่นเทอร์โมลิวอิคคริสตัล	39
3.8	แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ได้จากการประมวลผลภาพด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ ($T_j=28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_w=30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	41
3.9	แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิว	42
3.10	แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน	44
3.11	ลักษณะการวางเข็มสีที่ปากทางออกของท่อเจ็ทแต่ละแบบ	45
3.12	แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว	46
4.1	แสดงลักษณะการแพร่กระจายของเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ($Re=760$)	48
4.2	แสดงลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ($Re=760$)	48
4.3	แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ ($Re=760$, วางเข็มตำแหน่ง C, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)	49
4.4	แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=8D$ ($Re=760$, วางเข็มตำแหน่ง C, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)	50
4.5	ผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L= 2D$ ($Re=760$, วางเข็มที่ตำแหน่ง B, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ($\dot{q}=447 \text{ W/m}^2$, $T_j=30^\circ\text{C}$, $Re=760$)	53
4.7	แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากเจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)	55
4.8	แสดงโครงสร้างการไหลบนพื้นผิวหลังจากเจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า	55
4.9	แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากเจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)	56
4.10	แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากเจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)	56
4.11	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ $L=2D$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	58
4.12	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะ $L=2D$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	58
4.13	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ ที่ระยะ $L=2D$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	59
4.14	แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่สเปิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ที่ระยะ $L=2D$ ระยะเวลาหลังจากเจ็ทพุ่งชน 270 sec ($Re=20,000$)	60
4.15	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สเปิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$)	60
4.16	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ ($\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$) และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ ($\dot{q}=447 \text{ W/m}^2$, $T_j=30^\circ\text{C}$, $Re=760$) ที่ระยะ $L=2D$	62
4.17	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์จากผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยและผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ ($Re=20,000$ เท่ากันทั้งสองกรณี)	63
4.18	แสดงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ($Re=20,000$)	64

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะ $L=4D$ ($\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	66
4.20	แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ $L=4D$ ($Re=20,000$)	66
4.21	แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $L=4D$ ($Re=20,000$)	67
4.22	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะ $L=10D$ ($\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	69
4.23	แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ $L=10D$ ($Re=20,000$)	69
4.24	แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $L=10D$ ($Re=20,000$)	70
4.25	แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่เกิดการผสมกันในส่วนแกนกลางของเจ็ทที่เกิดจากผลของสันแผ่นบิดกรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.00$	71
4.26	แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	72
4.27	แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	72
4.28	แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	73
4.29	แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)	73
4.30	ผลจากการชนกันของเจ็ทผนังทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ที่เงื่อนไขระยะ $L=2D$ และระยะ $S=4D$ ($Re=20,000$)	75
4.31	แสดงปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนัง	75

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)	76
4.33	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)	76
4.34	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)	77
4.35	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)	77
4.36	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $S=2D$ ($Re=20,000$)	80
4.37	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะ $S=2D$ ($Re=20,000$)	80
4.38	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $S=4D$ ($Re=20,000$)	81
4.39	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำสเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แฉวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะ $S=4D$ ($Re=20,000$)	81
4.40	แสดงการเบี่ยงจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลาง กรณีที่เงื่อนไขระยะ S น้อย และระยะ L สูง	83

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ภค 1	92
ภค 2	93
ภข 1	95
ภข 2	96
ภข 3	97
ภข 4	98
ภข 5	99
ภข 6	100
ภข 7	101
ภค 1	103
ภง 1	105
ภง 2	106
ภจ 1	108
ภจ 2	109

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ภจ 1	แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ ($\dot{q} = 447 \text{ W/m}^2$, $T_j = 30^\circ\text{C}$, $\text{Re} = 760$)	110

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	คือ	พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
A	คือ	พื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส (m^2)
B	คือ	ความเข้มของสีน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัล
BB	คือ	ความเข้มของสีน้ำเงินที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลไม่แสดงสี
B_{max}	คือ	ความเข้มสูงสุดของสีน้ำเงินที่แผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบ อุณหภูมิ
D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (m)
G	คือ	ความเข้มของสีเขียวของแผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัล
GB	คือ	ความเข้มของสีเขียวที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลไม่แสดงสี
G_{max}	คือ	ความเข้มสูงสุดของสีเขียวที่แผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบ อุณหภูมิ
G_n	คือ	โมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ท ($kg \cdot m/s$)
G_θ	คือ	โมเมนตัมตามแนวสัมผัส ($kg \cdot m/s$)
H	คือ	ความสูงแผ่นบีด
h	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
I	คือ	กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส (A)
k	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล ($W/m \cdot ^\circ C$)
l	คือ	ความยาวแผ่นบีด (m)
M	คือ	ความยาวของเกลียว(m)
n	คือ	จำนวนเกลียว
\dot{Q}	คือ	อัตราการพาความร้อน (W)
\dot{q}	คือ	ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)
R	คือ	รัศมีของท่อเจ็ท (m)
R	คือ	ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส (Ω)
R	คือ	ความเข้มของสีแดงของแผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัล
RB	คือ	ความเข้มของสีแดงที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลไม่แสดงสี
R_{max}	คือ	ความเข้มสูงสุดของสีแดงที่แผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบ อุณหภูมิ

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

r	คือ	พิกัดในแนวรัศมีของเจ็ท
T_j	คือ	อุณหภูมิของเจ็ท ($^{\circ}\text{C}$)
T_{LC}	คือ	อุณหภูมิของพื้นผิวฟุ้งชนที่วัดจากแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัล ($^{\circ}\text{C}$)
T_w	คือ	อุณหภูมิตั้งบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	คือ	อุณหภูมิของของไหล ($^{\circ}\text{C}$)
\bar{V}_j	คือ	ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อเจ็ท (m/s)
V_n	คือ	ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท (m/s)
V_{θ}	คือ	ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท (m/s)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (gk/m^3)
ΔT	คือ	ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
ν	คือ	ความหนืดเชิงจลน์ของเจ็ท (m^2/s)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาทางด้านพลังงาน โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มปริมาณการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการพยายามหาวิธีการที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน สำหรับวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยประหยัดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมคือ การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์และกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับความร้อน เนื่องจากในกระบวนการผลิตวัตถุดิบที่เป็นโลหะ แก้ว สิ่งทอ อาหาร ยา วัคซีน จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และกระบวนการทางด้านความร้อน หากมีการพัฒนาให้อุปกรณ์ด้านความร้อนมีประสิทธิภาพสูงจะสามารถช่วยลดต้นทุนการใช้พลังงานได้มหาศาลในแต่ละปี

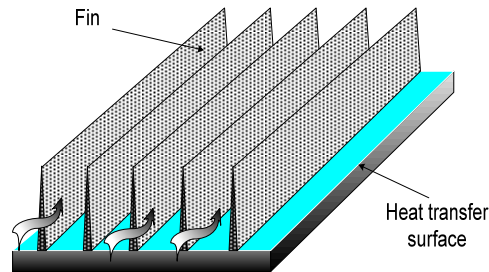
โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ด้านความร้อนจะมีกระบวนการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างตัวกลางกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนหลายๆลักษณะ เช่น การให้ความร้อน (Heating) การระบายความร้อน (Cooling) หรือการเป่าแห้ง (Drying) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (Convection heat transfer) สำหรับอัตราการพาความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวสามารถแสดงในรูปสมการดั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

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

โดยที่ \dot{Q} คือ อัตราการพาความร้อน
 h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
 A คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

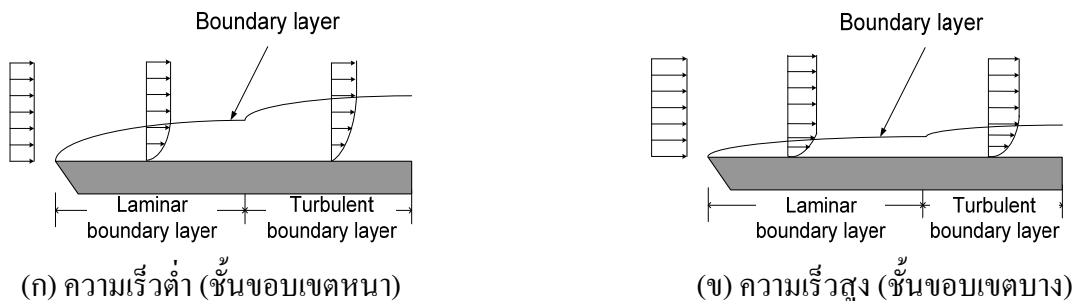
จากสมการที่ (1.1) หากต้องการเพิ่มอัตราการพาความร้อน \dot{Q} สามารถทำได้สองวิธีคือ วิธีการเพิ่มพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน A ทำได้โดยการเพิ่มพื้นผิวที่สัมผัสกับของไหล เช่น การติดครีป (Fin) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนตามที่แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งวิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับงานประเภทที่ไม่คำนึงถึงขนานและน้ำหนักของอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามไม่เหมาะสำหรับงานบางประเภทเนื่องจากวิธีดังกล่าวมีผลเสียที่ตามมาคือ สิ้นเปลืองวัสดุ อุปกรณ์มีขนาดใหญ่และมี

น้ำหนักมาก หากกรณีที่เป็นการไหลในช่องทางปิดก็จะเกิดการสูญเสียความดันในระบบ เนื่องจากตัวครีบจะเป็นตัวต้านการไหล ทำให้ต้องเพิ่มกำลังของปั๊มหรือพัดลมในระบบให้มากขึ้น



รูปที่ 1.1 แสดงการติดครีบ (Fin) ลงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

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



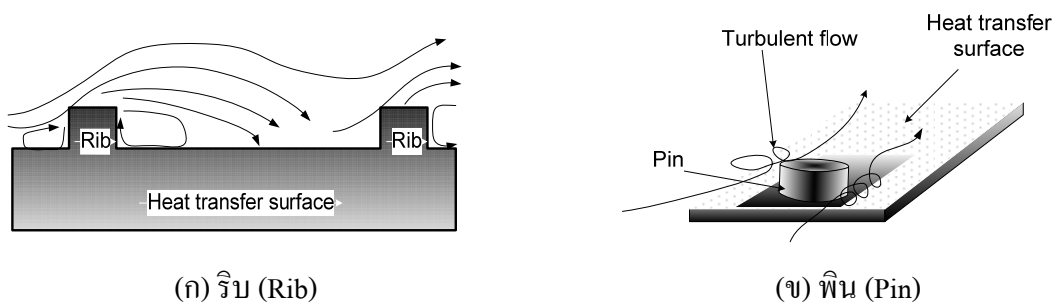
(ก) ความเร็วต่ำ (ชั้นขอบเขตหนา)

(ข) ความเร็วสูง (ชั้นขอบเขตบาง)

รูปที่ 1.2 แสดงชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว

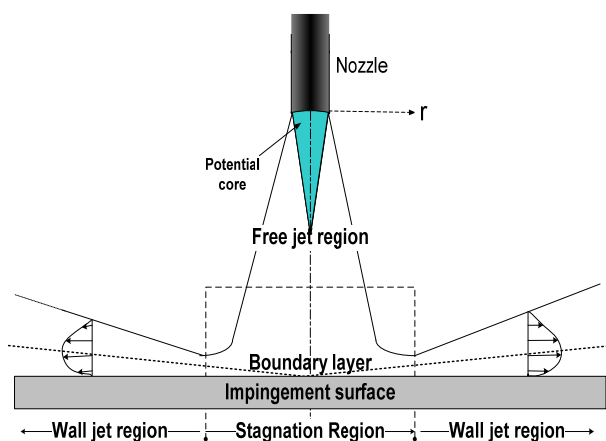
การเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h สามารถทำได้อีกวิธีคือ การทำลายชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับพื้นผิว ด้วยการติดอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulator)

เช่น กลุ่มของริบ (Rib) หรือพิน (Pin) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนตามที่แสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวได้ เนื่องจากการไหลจะเกิดกระแสหมุนวนขึ้นเมื่อผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน ทำให้ชั้นขอบเขตการไหลถูกทำลาย แต่อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องคำนึงถึงการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วนด้วยวิธีการติบริบและพิน

การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (Impinging jet) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ของไหลจากหัวฉีด (Nozzle) พุ่งชนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 วิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เหมาะสำหรับการใช้ในระบบการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าวิธีอื่นๆเมื่อเทียบอัตราการไหลที่เท่ากัน จึงสามารถช่วยประหยัดพลังงานของปั๊มหรือพัดลมได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเฉพาะจุดโดยการใช้เจ็ทลำเดียว แต่อย่างไรก็ตามอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ในกรณีที่ต้องการความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวหรือพื้นผิวถ่ายเทความร้อนมีบริเวณกว้าง จำเป็นต้องใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวตามความเหมาะสม



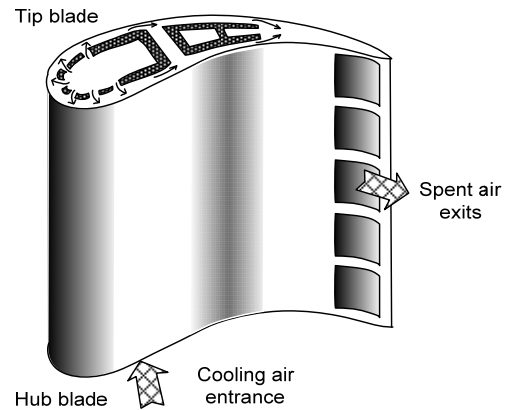
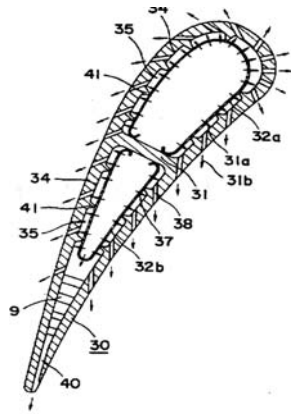
รูปที่ 1.4 แสดงวิธีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน

1.2 การตรวจเอกสาร

การถ่ายเทความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้มีการศึกษามานานตั้งแต่อดีต มีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทและคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกเจ็ทพุ่งชน จากการที่ได้ศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกชนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเจ็ทก่อนพุ่งชนและการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวหลังการชน เนื่องจากการใช้เจ็ทพุ่งชนนั้นให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวสูงกว่าวิธีอื่นๆ จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเช่น การระบายความร้อนใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือใช้ในอุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำเจ็ทพุ่งชนไปใช้งานในอุปกรณ์ด้านความร้อนที่ได้รับการจดสิทธิบัตรและการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนรวมถึงการศึกษาโครงสร้างลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน

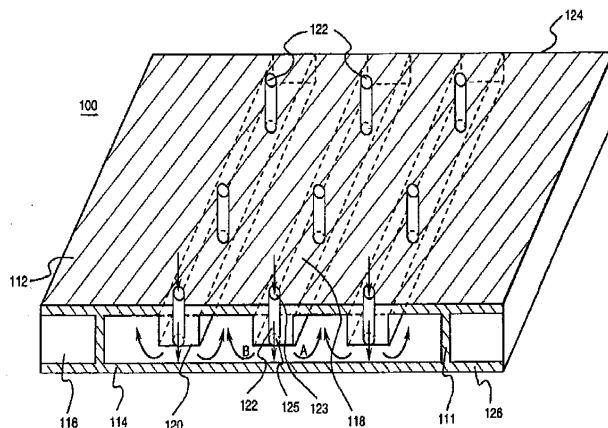
1.2.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน

สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,533,864 การระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ [1] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์โดยใช้เจ็ทพุ่งชนตามที่ได้แสดงในรูปที่ 1.5 ในการออกแบบได้เป่าอากาศไหลเข้าด้านในใบพัดผ่านช่องด้านล่างของใบพัด หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านรูต่างๆที่ได้ออกแบบไว้และพุ่งชนพื้นผิวที่ต้องการระบายความร้อน ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างภายในใบพัดค่อนข้างที่จะซับซ้อนโดยเฉพาะใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ที่มีขนาดเล็ก

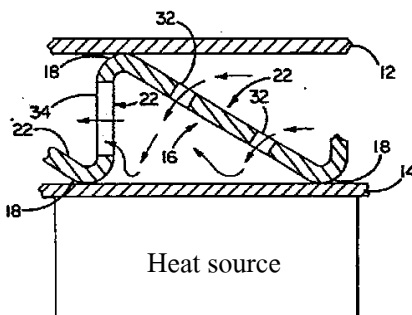


(ก) ภาพตัดของใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ (ข) โครงสร้างภายในของใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์
รูปที่ 1.5 การระบายความร้อนในใบพัดก๊าซเทอร์ไบน์ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 5,533,864 [1])

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

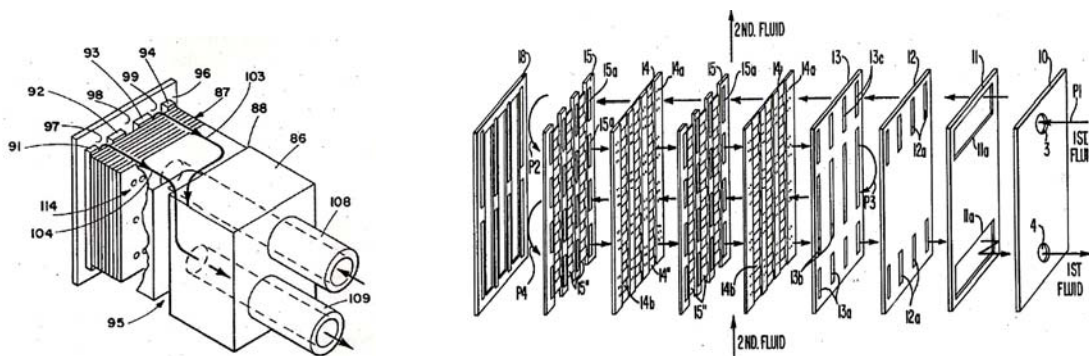


รูปที่ 1.6 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 6,000,908 [2])



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

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



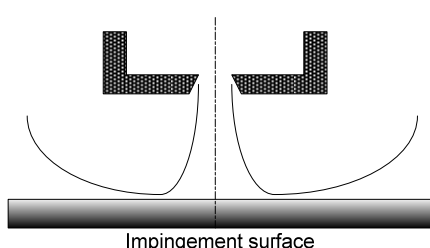
รูปที่ 1.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและ โครงสร้างภายใน (สิทธิบัตรลำดับที่ US 4,494,171[4])

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

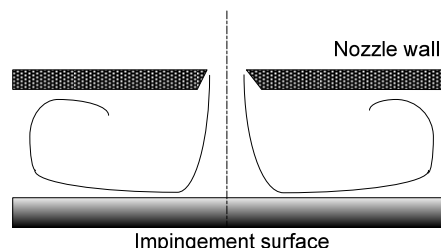
พุ่งชนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนของแผ่นถัดไป หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลผ่านแผ่นออรัฟหลายๆ ชั้นในลักษณะเดียวกัน

1.2.2 งานวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

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



(ก) แบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด

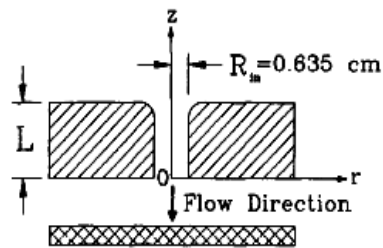


(ข) แบบติดตั้งผนังด้านหัวฉีด

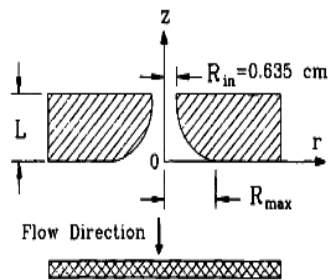
รูปที่ 1.9 แสดงเปรียบเทียบการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทโดยติดตั้งผนังด้านหัวฉีด

Ashforth-Frost และคณะ [6] ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทจากหัวฉีดแบบสลิต (Slot nozzle) ที่พุ่งชนพื้นผิวโดยทำการวัดความเร็วเฉลี่ยและระดับความปั่นป่วน (Turbulence) ตามแนวแกนของเจ็ทและหน้าตัดของเจ็ท จากการศึกษาพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสอดคล้องกับความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่วัดได้ คือในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4W$ (W คือความกว้างของสลิต) ซึ่งเป็นระยะที่โพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว พบว่าระดับความปั่นป่วนจุดที่เจ็ทพุ่งชนบนผนังมีค่าน้อย และในขณะที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบ

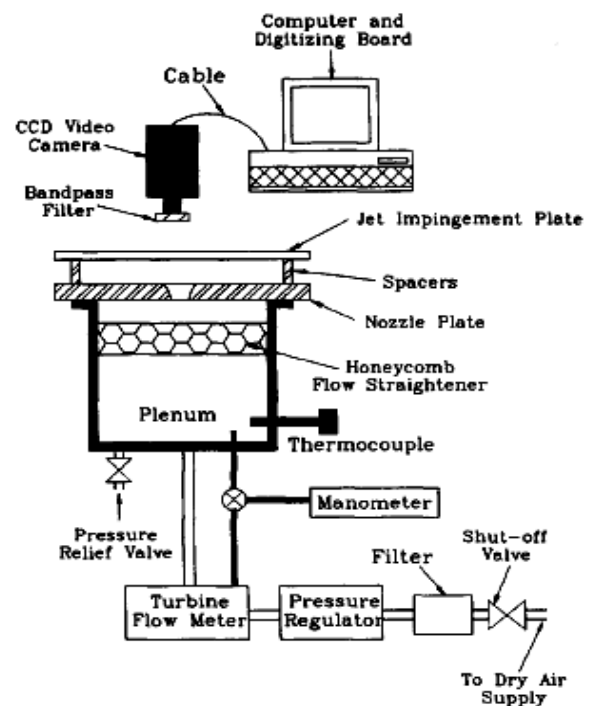
เป็นการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิว ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณ คือ จุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน แต่ในกรณีนี้ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=9.2W$ เนื่องจากที่ระยะดังกล่าวโพเทินเชียลคอร์ของเจ็ทหมดลงทำให้ระดับความปั่นป่วนในเจ็ทสูงขึ้น และเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนที่ระยะห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ



(ก) ออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบคม



(ข) ออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบมน



(ค) ชุดทดลอง

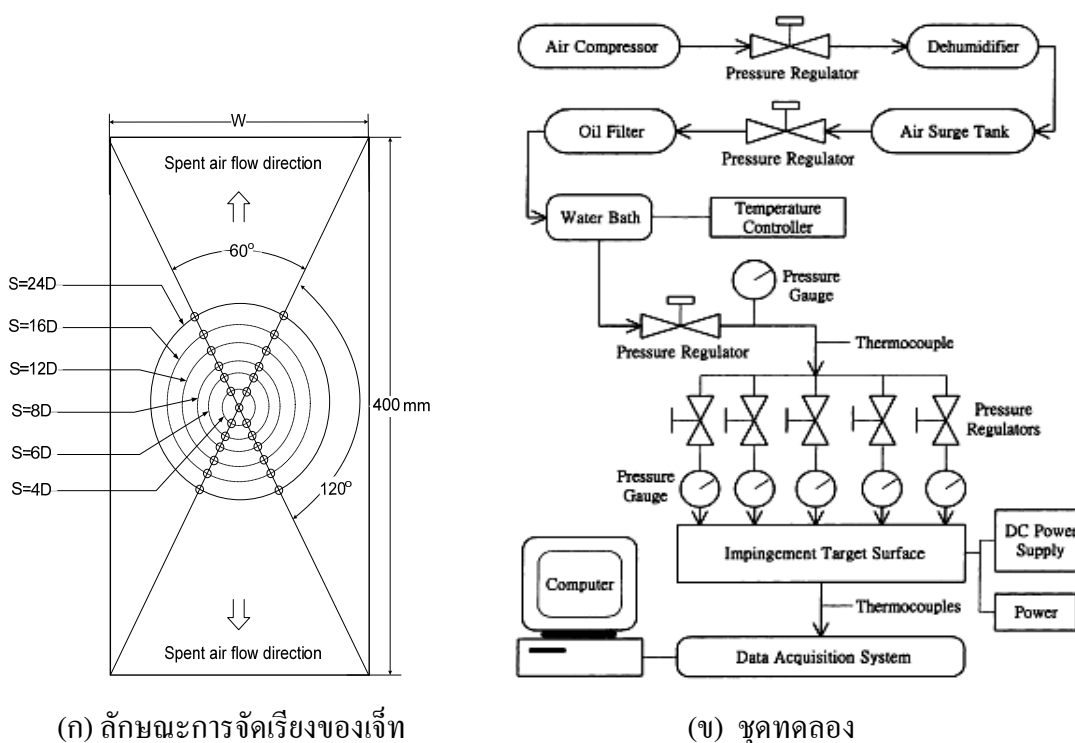
รูปที่ 1.10 แสดงลักษณะหัวฉีดและชุดทดลองของ Colucci และ Viskanta [7]

Colucci และ Viskanta [7] ได้ศึกษาผลของลักษณะปากทางออกของหัวฉีดที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน หัวฉีดที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบออร์ริฟิสมีสองลักษณะ คือออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบคม (รูปที่ 1.10 (ก)) และออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบมน (รูปที่ 1.10 (ข)) จากการศึกษาพบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L \leq D$ (D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของออร์ริฟิส) ลักษณะปากทางออกของออร์ริฟิสจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวอย่างมาก โดยที่ออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบมนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าออร์ริฟิสที่ทางออกแบบขอบคม โดยเฉพาะที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่สูง $Re \geq 30000$ และนอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ บริเวณที่มีการถ่ายเท

ความร้อนสูงสุดบนพื้นผิวจะเกิดขึ้นสองบริเวณ โดยบริเวณแรกจะเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ($r=0$) และบริเวณที่สองจะเกิดขึ้นตามแนวรัศมีที่อยู่ในช่วง $r=1D-2D$ ห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยที่ตำแหน่งของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สองจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของหัวฉีดและค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

1.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

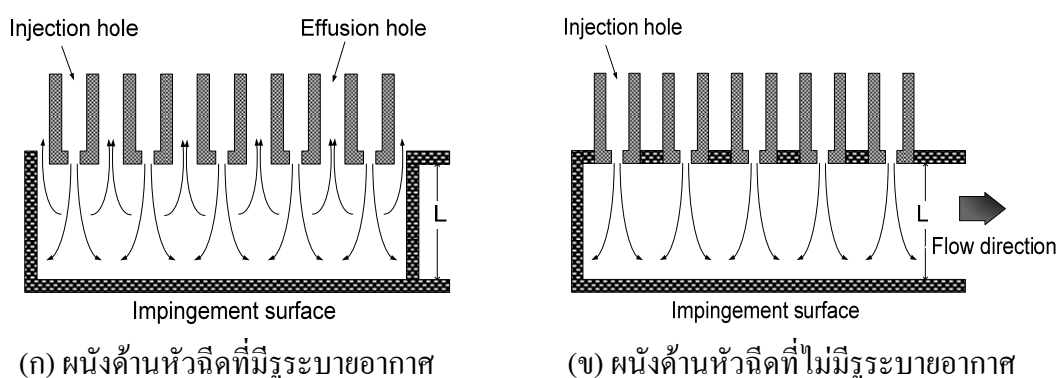
ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงกลุ่มของเจ็ท ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) รวมถึงผลกระทบของกระแสไหลตัด (Cross flow) ซึ่งมีผลต่อลักษณะการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว มีหลายงานวิจัยพยายามที่จะศึกษาหาตัวแปรดังกล่าวเพื่อหาเงื่อนไขที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้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



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) ในการทดลองได้กำหนด

ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L = 2D, 3D, 4D$ และ $5D$ ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อยู่ในช่วง $Re=10,000 - 30,000$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทจะอยู่ในช่วง $S = 4D-24D$ จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลทำให้บริเวณที่เจ็ทที่อยู่ตรงกลางพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือ ที่เงื่อนไขระยะ $L= 2D$ และระยะ $S=8D$ ที่เงื่อนไขระยะ $L=3D$ และระยะ $S=12D$ และที่เงื่อนไขระยะ $L=5D$ และระยะ $S=6D$



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 $L \geq 2D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของผนังหัวฉีดทั้งสองแบบจะแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L < 2D$ หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะถูกจำกัดบริเวณการไหลเกิดการรวมตัวกันเป็นกระแสไหลตัด (Cross flow) ครอบคลุมการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวลดลง แต่ในกรณีที่ผนังหัวฉีดมีการเจาะรูระบายลมทิ้ง จะทำให้เจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิวระบายออกตามรูที่เจาะไว้ ส่งผลให้เกิดการไหลครอบคลุมเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวน้อยลง จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบระบายลมทิ้งลักษณะดังกล่าว หากนำไปใช้งานจริงจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น

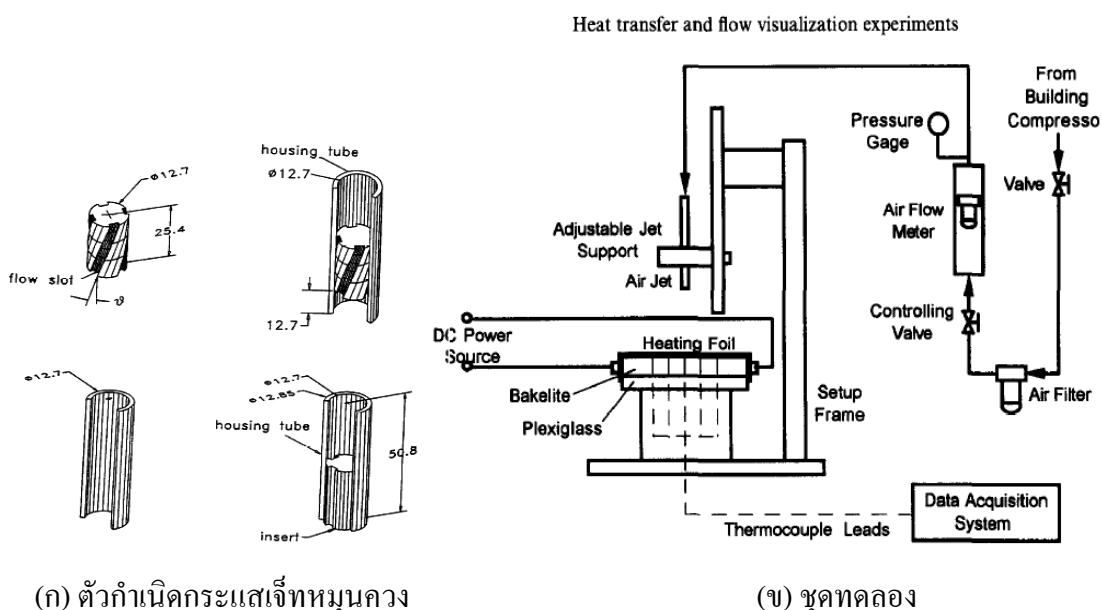
ระหว่างอากาศที่ไหลเข้าท่อเจ็ทและไหลออกทางรูระบาย ทำให้อากาศที่ไหลเข้าและไหลออกมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากช่องทางเข้าและช่องทางออกของอากาศอยู่ติดกัน

Fenot และคณะ [10] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโค้งโดยใช้เจ็ทแฉวพุ่งชน ในการทดลองได้ใช้เจ็ทอากาศเรียงเป็นแบบแฉวจำนวน 7 ลำ พุ่งชนด้านในของพื้นผิวโค้งด้านเว้า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบแบบมีผนังด้านหัวฉีด (Nozzle wall) และพื้นผิวเรียบที่ไม่มีผนังด้านหัวฉีด จากการทดลองพบว่ารัศมีส่วนโค้งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ในกรณีที่รัศมีส่วนโค้งมาก นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวจะลดลงเนื่องจากเจ็ทจะถูกจำกัดบริเวณการไหลด้วยผิวโค้งที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวจะสอดคล้องกับกรณีที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเรียบแบบมีผนังด้านหัวฉีด สำหรับกรณีที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวเรียบที่ไม่มีผนังด้านหัวฉีดพบว่า มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโค้งและพื้นผิวเรียบที่มีผนังด้านหัวฉีด เนื่องจากเจ็ทสามารถไหลระบายออกนอกบริเวณที่พุ่งชนได้ดี

1.2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิว

ในหัวข้อนี้จะนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทหมุนควงที่ใช้ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงลักษณะต่างๆ เช่น การใช้แผ่นบิด แผ่นบิดแบบกากบาทและแท่งเฮลิคอลลสอดในท่อเจ็ท นอกจากนี้ยังได้ศึกษากรณีที่ใช้ใบบังคับทิศทางติดที่ปากทางออกของหัวฉีด

Huang และ El-Genk [11] ได้ออกแบบอุปกรณ์สร้างกระแสเจ็ทหมุนควงสำหรับสอดในท่อเจ็ท โดยอุปกรณ์มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกตัน คว้านให้เป็นร่องจำนวน 4 ร่อง ทำมุมกับแกนของเจ็ทตามที่แสดงในรูปที่ 1.13 (ก) ในการทดลองมุมเอียงที่ใช้ในการกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงได้แก่ 15° , 30° และ 45° จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีที่ใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวพบว่า การใช้เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและเพิ่มความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนได้เมื่อเทียบกับเจ็ทจากท่อเปล่า และเงื่อนไขที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด คือในกรณีที่มุมของร่องเท่ากับ 15 องศา และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทโดยใช้ควันผสมกับเจ็ทอากาศ (Smoke flow technique) การใช้เส้นลวดร้อนทาน้ำมันเพื่อกำเนิดควัน (Smoke wires technique) และใช้ฟองอากาศผสมกับเจ็ทน้ำเพื่อดูลักษณะการไหลพบว่าเจ็ทหมุนควงมีบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนบนผนังเป็นบริเวณกว้างกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า และนอกจากนี้ยังพบว่าเจ็ทมีการหมุนควงภายในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า



(ก) ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง

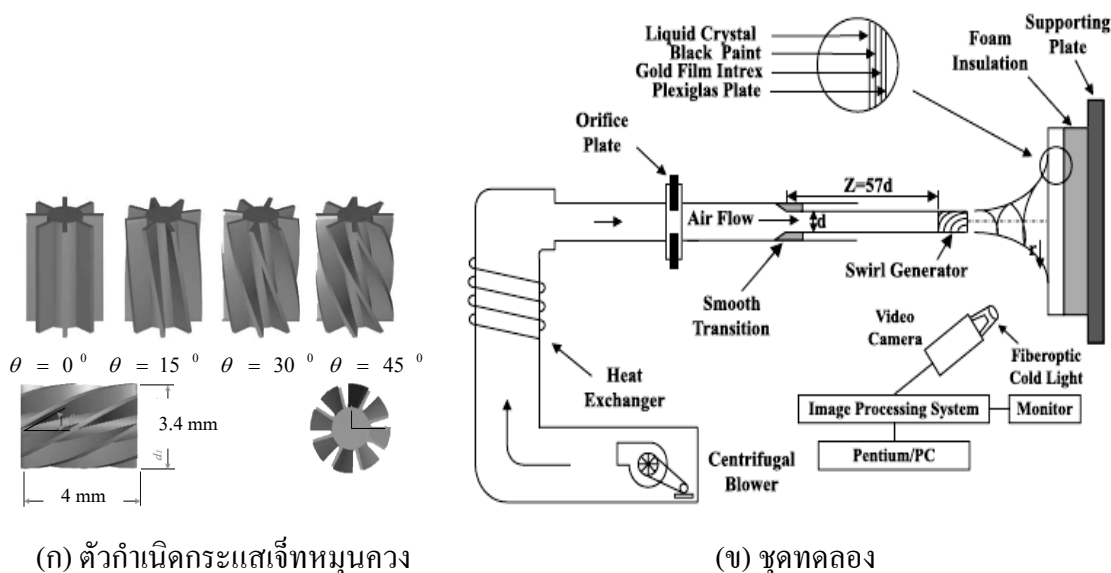
(ข) ชุดทดลอง

รูปที่ 1.13 ลักษณะของตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงและชุดทดลองของ Huang และ El-Genk [11]

Wen และ Jang [12] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างเจ็ทจากท่อเปล่ากับเจ็ทหมุนควงที่สอดแผ่นบิดแบบธรรมดาและแผ่นบิดแบบกากบาทจากการศึกษาพบว่า เจ็ทที่ไหลออกมาจากท่อที่สอดแผ่นบิดแบบกากบาทจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด รองลงมาคือท่อที่สอดแผ่นบิดแบบธรรมดาและท่อเปล่าตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ส่วนการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วยวิธีเซิงท์สไน์ ได้ใช้เทคนิคผสมควันในเจ็ทอากาศ (Smoke flow technique) ทำให้สามารถเห็นลักษณะการไหลของเจ็ท ซึ่งพบว่าการไหลของเจ็ทหมุนควงบนพื้นผิวจะมีการหมุนวนของอากาศบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเกิดขึ้นและยังเกิดการผสมกับอากาศบริเวณรอบๆ ได้ดีกว่าเจ็ทจากท่อเปล่าอีกด้วย

Lee และคณะ [13] ได้ใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นใบบังคับทิศทางติดตั้งในที่ปากทางออกของท่อเจ็ทเพื่อเป็นตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงตามที่แสดงในรูปที่ 1.14 (ก) โดยใบบังคับทิศทางทำมุมกับแนวแกนที่มุม θ ต่างๆ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าสเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl Number, Sw) โดยเริ่มที่ $Sw=0.0 (\theta=0^\circ)$, $0.21 (\theta=15^\circ)$, $0.44 (\theta=30^\circ)$, $0.77 (\theta=45^\circ)$, และเจ็ทจากท่อเปล่า สำหรับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 23,000 จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพบว่า ระดับการหมุนควงของเจ็ทมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนในบริเวณใกล้จุดที่เจ็ทพุ่งชนมาก โดยที่เงื่อนไขค่า $Sw=0.21$ และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ จะให้สเวิร์ลนัมเบอร์สูงสุด และที่เงื่อนไขเดียวกันนี้สเวิร์ลนัมเบอร์เฉลี่ยบน

พื้นผิวจะสูงกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง $L=10D$ อิทธิพลของระดับการหมุนควงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง



(ก) ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง

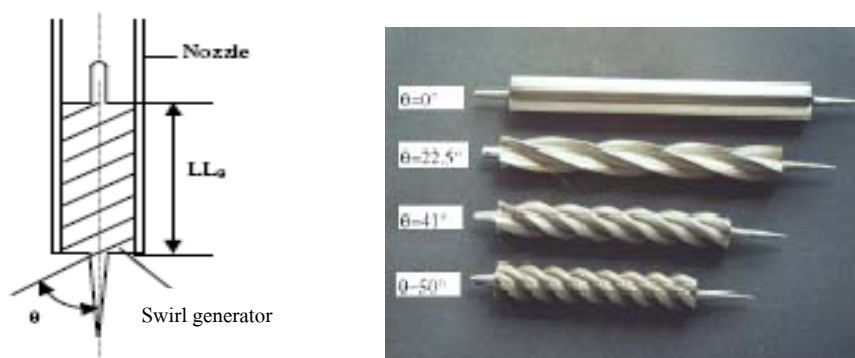
(ข) ชุดทดลอง

รูปที่ 1.14 ลักษณะของตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงและชุดทดลองของ Lee และคณะ [13]

Alekseenko และคณะ [14] ได้สร้างเจ็ทหมุนควงโดยใช้หัวฉีดที่มีลักษณะเป็นท่อกลมที่ปากทางออกจะค่อยๆลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลง และด้านในจะติดตั้งตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงที่มีลักษณะเป็นใบบังคับทิศทางที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน โดยค่าสแควร์ลันด์นัมเบอร์อยู่ในช่วง 0-1.0 เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=8900$ และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=3D$ จากผลการทดลองพบว่าสแควร์ลันด์นัมเบอร์ของเจ็ทที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการแพร่กระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้น แต่การกระจายตัวของความดันภายในเจ็ทจะลดลง อย่างไรก็ตามในการทดลองไม่ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน แต่ข้อมูลจากการทดลองก็เป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับแนวคิดที่จะนำเจ็ทหมุนควงไปใช้ในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เพราะอัตราการแพร่กระจายของเจ็ทและการกระจายความดันภายในเจ็ทจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วย

Bakirci และ Bilen [15] ได้ทำการทดลองวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ สำหรับหัวฉีดที่ใช้เป็นแบบท่อเปล่าและแบบท่อติดตั้งตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงที่เป็นแบบเฮลิคอลลตามทีแสดงในรูปที่ 1.15 โดยบิดให้เป็นเกลียวทำมุมกับแนวแกนดังนี้ $\theta = 0^\circ, 22.5^\circ, 41^\circ$ และ 50° สำหรับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง $Re=10,000-30,000$ และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

อยู่ระหว่าง $L = 6D - 14D$ สำหรับผลการทดลองปรากฏว่าท่อที่สอดเฮลิคอลลที่มีมุม $\theta = 50^\circ$ นัสเซิลตันัมเบอร์สูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะเกิดบริเวณรอบๆ แทนถึงสี่จุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากเจ็ทไหลแยกออกตามช่องทั้งสี่ ส่วนกรณีที่มีมุม $\theta = 22.5^\circ$ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส เหมาะสำหรับการออกแบบระบบระบายความร้อนที่มีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนพื้นที่แคบๆ และต้องการความสม่ำเสมอบนพื้นผิวที่สูง



รูปที่ 1.15 ลักษณะตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควงของ Bakirci และ Bilen [14]

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชนพื้นผิวพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนรวมถึงบริเวณรอบๆเจ็ทเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบไม่หมุนควง (เจ็ทจากท่อเปล่า) เนื่องจากการหมุนควงของเจ็ทจะเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบๆเจ็ท ทำให้เจ็ทมีอัตราการกระจายตัวที่เร็วและมีระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ในเจ็ทสูงเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบไม่หมุนควง ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวนั้นพบว่า ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเจ็ทหมุนควงมาประยุกต์ใช้ในกรณีกลุ่มของเจ็ท ซึ่งอาจจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากการผสมกันระหว่างเจ็ทหมุนควงก่อนพุ่งชนพื้นผิวและมีการไหลแบบหมุนควงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และอาจทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควง รวมถึงพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป เนื่องจากโครงสร้างการไหลกรณีกลุ่มของเจ็ทมีความซับซ้อน โดยเฉพาะการเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทหรือเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทผนัง ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทั้งสิ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

(1) ศึกษาพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ใช้เจ็ทหมุนควงพุ่งชน

(2) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ระดับการหมุนควงของเจ็ท ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงบนพื้นผิว เพื่อหาเงื่อนไขของตัวแปรที่เหมาะสมในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและปรับปรุงความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชน

(2) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบหรืออุปกรณ์การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นโลหะ การระบายความร้อนของใบพัดกังหันเทอร์ไบน์ การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และทำเตาอบแบบใช้เจ็ทอากาศร้อน

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

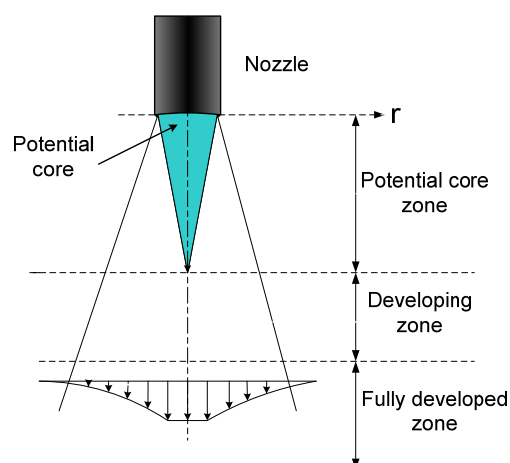
- (1) ศึกษาในกรณีความเร็วในการไหลของเจ็ทอยู่ในช่วงซับโซนิค
- (2) ศึกษากรณีการไหลของเจ็ทอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่เงื่อนไขอัตราการไหลคงที่
- (3) ศึกษากรณีที่ใช้แผ่นปิดสอดในท่อเจ็ทเพื่อเป็นตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง
- (4) ศึกษาในกรณีที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว
- (5) ศึกษากรณีเจ็ทหมุนควงลำเดี่ยวและกลุ่มของเจ็ท 9 ลำ ที่เรียงเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 แถว แถวละ 3 ลำ

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

โดยปรกติลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของเจ็ทที่ออกมาจากหัวฉีด ในขณะที่ต้องการกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจำเป็นต้องควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ท ซึ่งในการควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ทนั้นจะต้องศึกษาให้เข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ท สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว โครงสร้างการไหลของเจ็ทแบบกลุ่ม ลักษณะทั่วไปของเจ็ทหมุนควง และสุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง

2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

เจ็ทอิสระ (Free jet) คือ ของไหลที่ไหลออกจากหัวฉีดสู่ของไหลที่อยู่รอบๆ โดยที่บริเวณแกนกลางของเจ็ทจะมีความเร็วสูงสุด เมื่อห่างจากปากทางออกความเร็วในแนวรัศมีจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และความเร็วในแนวแกนของเจ็ทก็จะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกันจนกระทั่งความเร็วเป็นศูนย์ ในกรณีที่อุณหภูมิระหว่างเจ็ทและของไหลที่อยู่รอบเจ็ทมีความแตกต่างกันก็จะเกิดการสมดุอุณหภูมิขึ้นระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆ โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

(1) ช่วงโพเทินเชียลคอร์ (Potential core zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มไหลออกจากหัวฉีด ความเร็วของเจ็ทคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด หลังจากที่เจ็ทพุ่งออกจากหัวฉีด แรงหนืดที่เกิดจากผลต่างของความเร็วระหว่างเจ็ทกับของไหลที่หุ้ดล้อมอยู่รอบๆ จะทำให้บริเวณส่วนของโพเทินเชียลคอร์ (Potential core) ของเจ็ทมีขนาดเล็กลงและของไหลบริเวณรอบๆเจ็ทถูกดูดให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น มีผลทำให้หน้าตัดของเจ็ทขยายตัวกว้างขึ้นตามระยะห่างจากปากทางออก บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหน้าตัดเจ็ทรอบๆ โพเทินเชียลคอร์เรียกว่าเชียร์เลเยอร์ (Shear layer) ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของหัวฉีดยิ่งมาก ความหนาของเชียร์เลเยอร์ก็จะเพิ่มขึ้นและความยาวของโพเทินเชียลคอร์จะลดลง โดยปกติเจ็ทหน้าตัดวงกลมมีความยาวของโพเทินเชียลคอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 4 - 6 ของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลที่ปากทางออกหัวฉีด [5]

(2) ช่วงการไหลกำลังพัฒนาตัว (Developing zone) เป็นช่วงที่โพเทินเชียลคอร์หดไปและเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วในแนวแกนจะค่อยๆลดลงและมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนวแกนรัศมี ระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ภายในเจ็ทจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้

(3) ช่วงการไหลที่พัฒนาตัวแล้ว (Fully developed zone) เป็นบริเวณต่อจากช่วงการไหลกำลังพัฒนาตัวของเจ็ท ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์และเป็นบริเวณที่โมเมนตัมของเจ็ทจะลดลงเมื่อห่างออกมาจากปากทางออกของหัวฉีดมากขึ้น

2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

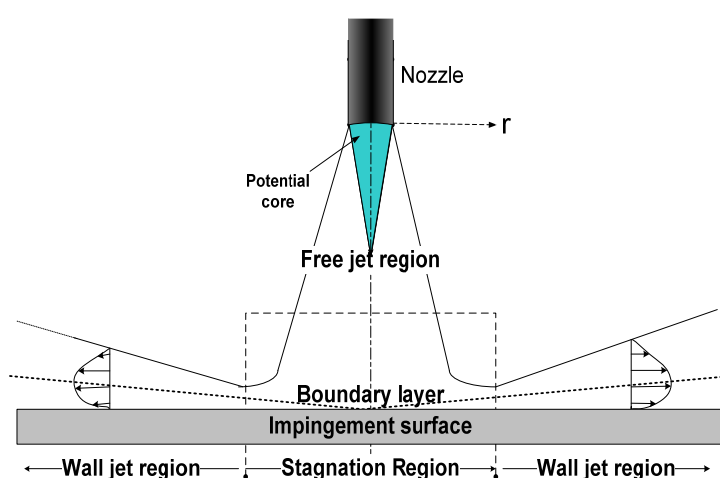
เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการไหลกรณีเจ็ทพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนดังนี้

(1) ช่วงเจ็ทอิสระ (Free jet region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีดซึ่งจะมีโพเทินเชียลคอร์ (Potential core) อยู่กึ่งกลางโดยที่ความยาวของโพเทินเชียลคอร์ขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยลักษณะทั่วไปส่วนที่เป็นเจ็ทอิสระของเจ็ทพุ่งชนจะเหมือนกับลักษณะทั่วไปของโครงสร้างการไหลเจ็ทอิสระ [5]

(2) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงและบริเวณรอบๆ ซึ่งก่อนเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวความเร็วของเจ็ทเริ่มลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนพื้นผิว

ล้อมรอบรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของการไหลรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลจากแนวแกนเป็นแนวรัศมีอย่างกะทันหันหลังจากการชนพื้นผิว

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



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ

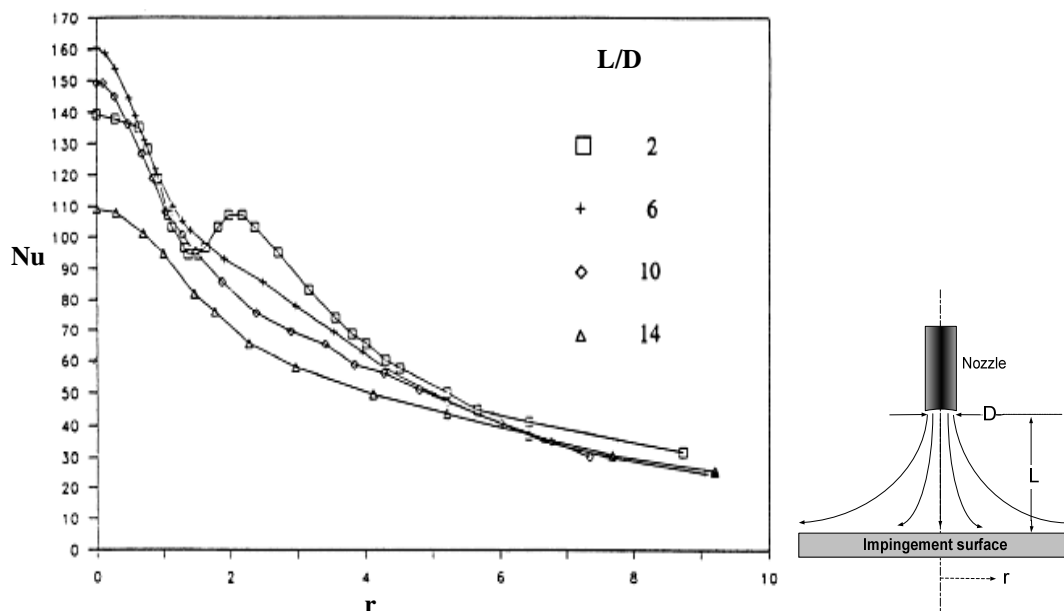
2.3 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน ได้แก่ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและชนิดของหัวฉีด ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิว

2.3.1 ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

โดยทั่วไปบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณรอบๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ในกรณีที่ส่วนปลายสุดของโพเทินเชียลคอร์พุ่งชนพื้นผิว จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงที่สุด เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีโมเมนตัมและมีค่าความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่สูง แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะลดลง เนื่องจากโมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง [5, 6, 7 และ 16]



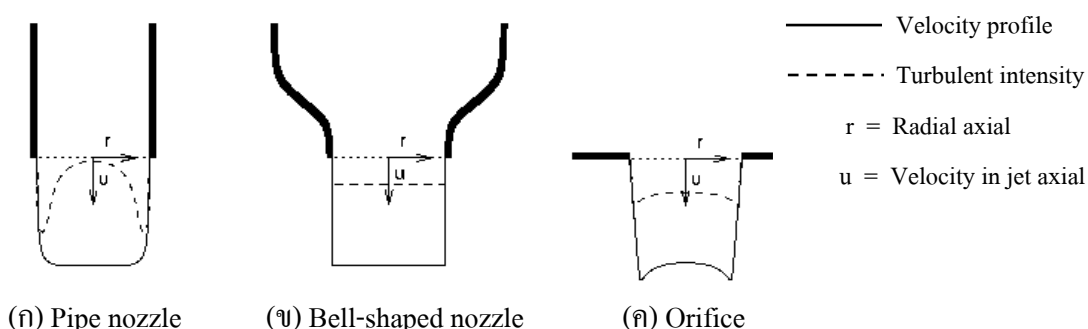
รูปที่ 2.3 การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ (กรณีที่ใช้หัวฉีดแบบท่อและ $Re=23,750$) [16]

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 อาจเกิดจากการที่เจ็ทผนังเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [6] หรืออาจเกิดจากความเร่งของการไหลบนพื้นผิวหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วง $r=1D$ ถึง $2D$ และอาจเกิดจากปรากฏการณ์ Surface renewal บนพื้นผิวที่เกิดจาก Large scale eddies ในโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนทำลายชั้นขอบเขตการไหล

บนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น [17] แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L > 2D$ จากรูปที่ 2.3 พบว่านัสเซิลด์นัมเบอร์ของแต่ละระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point, $r=0$) และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวแกนรัศมีของเจ็ท และนัสเซิลด์นัมเบอร์บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าสูงสุดที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=6D$ ซึ่งเป็นระยะที่โครงสร้างการไหลของเจ็ทในส่วนโพเทินเซียลคอร์กำลังจะหมดและระดับของความปั่นป่วนของเจ็ทเริ่มสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L > 6D$ เป็นระยะที่โมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลงตามระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง [5 และ 16]

2.3.2 ชนิดของหัวฉีด

รูปร่างของหัวฉีดจะมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติการไหลของเจ็ทสองประการคือ ลักษณะการกระจายความเร็ว (Velocity profile) และความปั่นป่วน (Turbulence profiles) ซึ่งคุณสมบัติการไหลของเจ็ททั้งสองประการมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว คือเจ็ทพุ่งชนที่มีความเร็วและระดับความปั่นป่วนที่สูงจะมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงตามไปด้วย จากรูปที่ 2.4 แสดงการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่ตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีด 3 แบบที่นิยมใช้ทั่วไป



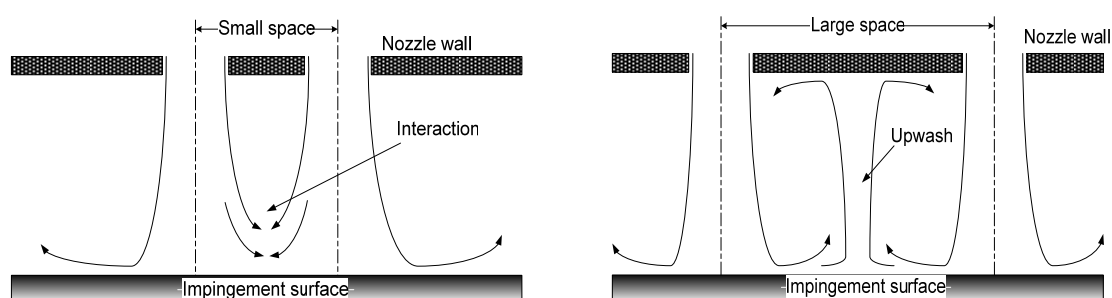
รูปที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติการกระจายความเร็วและการกระจายความปั่นป่วนที่ปากทางออกหัวฉีดแต่ละแบบ

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



(ก) กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย

(ข) กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมาก

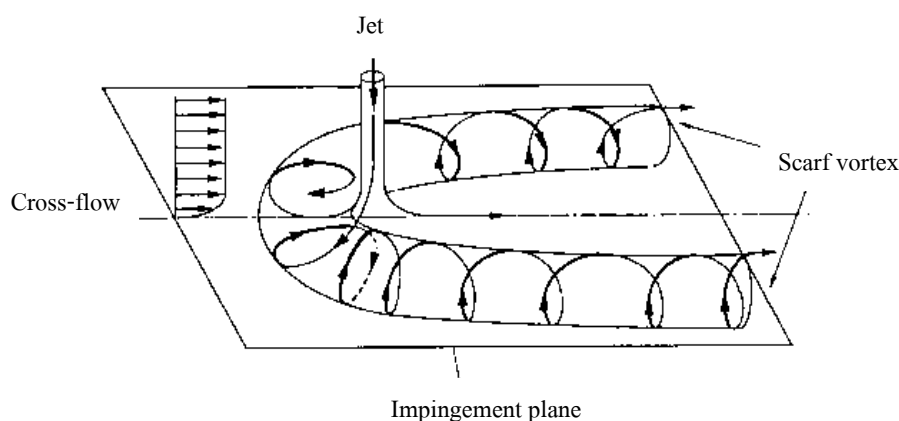
รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกลุ่มของเจ็ท [13]

โดยปรกติเจ็ทลำเดียวมักจะถูกนำไปใช้ในกรณีที่มีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีบริเวณจำกัดหรือเฉพาะจุดบนพื้นผิว แต่ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีบริเวณกว้างจำเป็นต้องใช้เจ็ทหลายๆลำหรือกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน (Multiple impinging jets) เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว โครงสร้างการไหลกรณีกลุ่มของเจ็ทจะซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทลำเดียว โดยเฉพาะในกลุ่มของเจ็ทจะมีตัวแปรที่เพิ่มเข้ามาเช่น รูปแบบการจัดเรียงตัวของเจ็ทและระยะห่างระหว่างลำเจ็ทซึ่งจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย (รูปที่ 2.5(ก)) ก่อนที่เจ็ททั้งสองลำจะพุ่งชนพื้นผิว จะเกิดการผสมกันระหว่างลำเจ็ททั้งสอง มีผลทำให้บริเวณโพแทสเซียมคอร์ในลำเจ็ทลดลง และระดับความปั่นป่วนในเจ็ทจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทลำเดียว หรือในกรณีที่ระยะห่าง

ระหว่างลำเจ็ทมาก (รูปที่ 2.5(ข)) ถึงแม้ก่อนเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะไม่เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กัน แต่หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแล้วจะเกิดการชนของเจ็ทผนังที่มาจากลำเจ็ทที่อยู่ติดกันแล้วเกิดการไหลแบบหมุนวน (Fountain) ในระหว่างลำเจ็ท [8]

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



รูปที่ 2.6 โครงสร้างการไหลแบบเกือกม้าที่เกิดจากกระแสลมตัดผ่านลำเจ็ทที่กระทบผนัง [9]

2.5 เจ็ทหมุนควง

เจ็ทหมุนควงเป็นเจ็ทของไหลเคลื่อนที่ออกจากหัวฉีดที่มีทั้งความเร็วตามแนวแกนและความเร็วแนวสัมผัส ซึ่งวิธีการสร้างเจ็ทหมุนควงสามารถทำได้หลายวิธี ในแต่ละวิธีโครงสร้างการไหลของเจ็ทจะแตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทั่วไปของเจ็ทหมุนควง นิยามของระดับการหมุนควงและตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง

2.5.1 คุณสมบัติทั่วไปของเจ็ทหมุนควง

เจ็ทหมุนควงเป็นการไหลที่รวมคุณสมบัติการหมุนที่มีส่วนของความเร็วในแนวสัมผัสเพิ่มขึ้นจากการไหลของเจ็ท ซึ่งคุณลักษณะบางประการที่แตกต่างจากการไหลของเจ็ทแบบไม่หมุนควง สำหรับเจ็ทไม่หมุนควงนั้นกลไกการกระจายตัวของเจ็ทจะเกิดจากการผสมกันที่ขอบของเจ็ทและของไหลรอบๆ แต่สำหรับเจ็ทหมุนควงแล้วเนื่องจากการหมุนควงทำให้เกิดความชัน

ของความดัน (Pressure gradient) ตามแนวแกนและแนวรัศมีของเจ็ท จึงทำให้การกระจายตัวของเจ็ทเกิดจากความชันของความดันด้วย นอกจากนั้นจะไม่พบส่วนของโพเทนเชียลคอร์ภายในโครงสร้างของเจ็ทหมุนควง ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกระดับการหมุนควงคือ สเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number, Sw) ซึ่งมีนิยามคืออัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมตามแนวสัมผัสต่อโมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ทตามที่ได้แสดงในสมการต่อไปนี้ [11 และ 14]

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

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

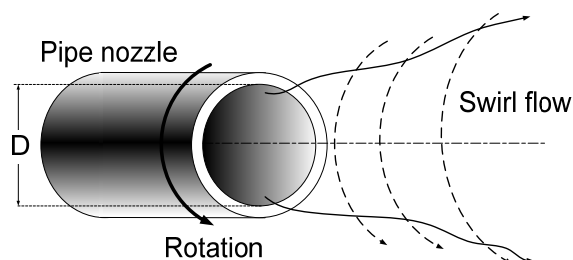
$$G_\theta = \int_0^{D/2} \rho V_n V_\theta r \cdot (2\pi r dr) \quad (2.3)$$

ในที่นี้	G_n	คือ	โมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ท
	G_θ	คือ	โมเมนตัมตามแนวสัมผัส
	D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของท่อเจ็ท
	V_n	คือ	ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท
	V_θ	คือ	ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล
	r	คือ	พิสัยในแนวรัศมีของเจ็ท

2.5.2 ตัวกำเนิดกระแสเจ็ทหมุนควง

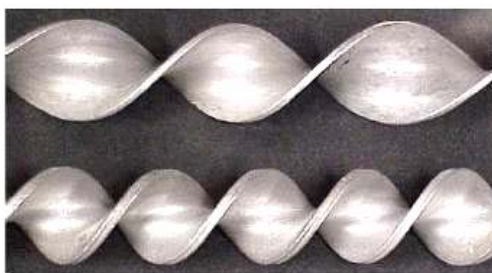
การสร้างเจ็ทหมุนควงนั้นจำเป็นต้องเพิ่มความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีจะมีโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่แตกต่างกัน

(1) วิธีการหมุนท่อเจ็ท วิธีนี้ความเร็วในการหมุนท่อเจ็ทจะมีผลต่อการเพิ่มความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท แต่เป็นวิธีที่ไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่และต้องมีอุปกรณ์หรือกลไกในการหมุนท่อเป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามข้อดีของวิธีนี้คือสามารถปรับระดับการหมุนควงของเจ็ทโดยการปรับความเร็วในการหมุนท่อ สามารถนำไปใช้งานที่เกี่ยวกับการผสมที่ต้องการปรับระดับการหมุนควงของเจ็ทที่สภาวะส่วนผสมต่างๆ



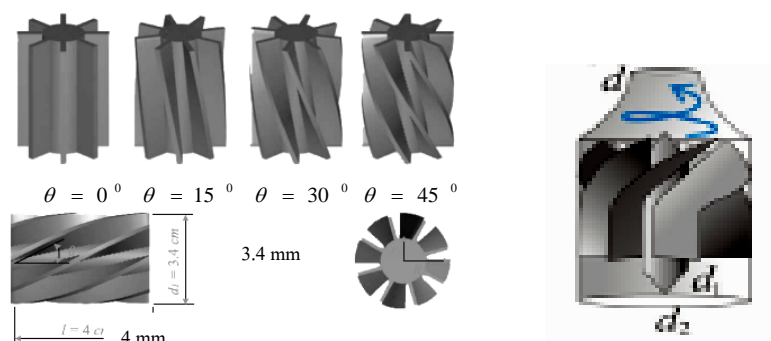
รูปที่ 2.7 การหมุนท่อเจ็ท

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



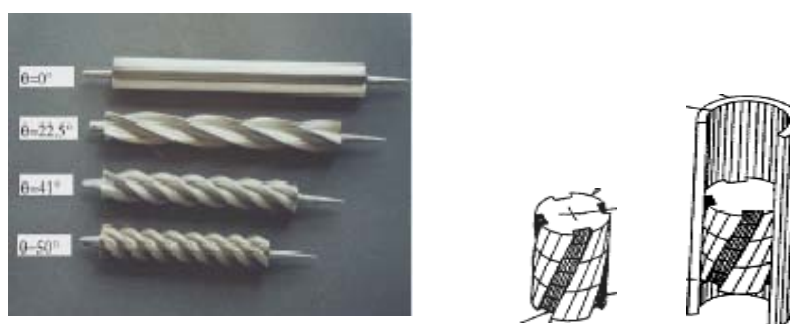
รูปที่ 2.8 แผ่นบิดที่ใช้สอดในท่อเจ็ท

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



รูปที่ 2.9 ลักษณะใบพัดบั้งกับทิศทางการบิดที่ปากทางออกของเจ็ท [13 และ 14]

(4) วิธีการสอดแท่งเฮลิคอลล (Helical) วิธีนี้จะสอดแท่งเฮลิคอลลในท่อเจ็ทตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.10 กระบวนการสร้างจะคล้ายกับวิธีใช้ใบบั้งกับทิศทางการบิด แท่งเฮลิคอลลจะทำจากแท่งทรงกระบอกตันที่ผิวถูกกัดให้เป็นร่อง ความเอียงของร่องดังกล่าวก็จะเป็นตัวกำหนดระดับของการหมุนควงของเจ็ทสามารถเพิ่มหรือลดจำนวนร่องของช่องทางการไหลได้ตามความต้องการ แต่เจ็ทหมุนควงที่ได้เกิดจากการไหลที่ออกจากร่องเท่านั้น



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

เนื่องจากการสร้างเจ็ทหมุนควงแต่ละวิธี จะมีโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่แตกต่างกัน แต่จะมีคุณสมบัติที่เหมือนกันคือเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงของเจ็ทหรือสเปิร์ลนัมเบอร์แล้ว การกระจายตัวของเจ็ทจะเพิ่มมากขึ้น ระดับความปั่นป่วนภายในเจ็ทจะสูงขึ้น จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาพบว่า โครงสร้างการไหลของเจ็ทจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ดังนั้น ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทหมุนควงพุ่งชน ควรศึกษาคุณสมบัติการกระจายตัวของเจ็ทหมุนควงหรือโครงสร้างการไหลของเจ็ทของแต่ละวิธีที่เลือกใช้เพื่อให้สามารถเข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควง

2.6 สมการพื้นฐานที่ใช้ในคำนวณการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทฟุ้งชน

ในกรณีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทฟุ้งชนจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ สำหรับสมการพื้นฐานในการคิดอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนบนพื้นผิวคือ

$$\dot{Q} = hA(T_\infty - T_w) \quad (2.4)$$

$$\dot{Q} = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.5)$$

ในที่นี้ \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล

T_w คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

สมการ (2.4) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่ามากกว่าอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและสมการ (2.5) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

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

$$h = \frac{\dot{q}}{T_\infty - T_w} \quad (2.6)$$

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_\infty} \quad (2.7)$$

ในที่นี้ \dot{q} คือ ฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิว

สมการ (2.6) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่ามากกว่าอุณหภูมิตนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อนและสมการ (2.7) ใช้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิตนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับที่สามารถนำมาวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติคือจำนวนนัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.8)$$

ในที่นี้

- h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
- D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท
- k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

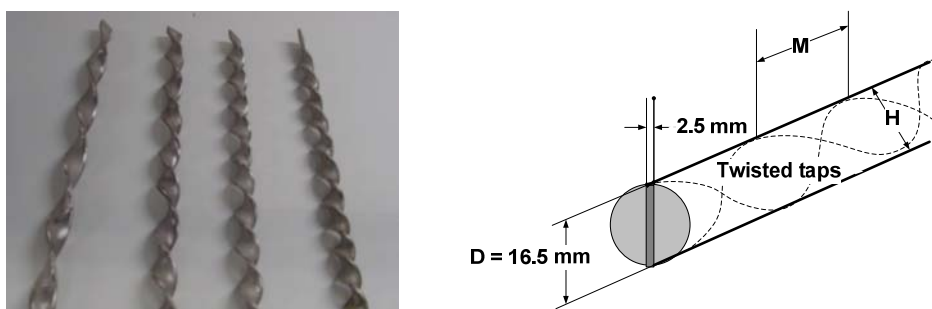
บทที่ 3

ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการสร้างกระแสเจ็ทหมุนควง จากนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดของชุดทดลองและเงื่อนไขการทดลอง สำหรับการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนแรกเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลและการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชงทซ์น เพื่อคุณลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่ปากทางออกและอธิบายกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควง

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 แผ่นบิดทำมาจากแผ่นสแตนเลสแบนมีความหนา 2.5 mm ความกว้าง 16.5 mm และมีความยาวหลังจากที่ได้บิดเกลียวแล้ว 300 mm บิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยสอดในท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.5 mm ยาว 300 mm โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นบิดสอดในลักษณะเสมอกับ

ปากทางออกของท่อเจ็ท และในทุกการทดลองได้กำหนดให้สันของแผ่นบิดที่ตำแหน่งปลายท่อเจ็ท อยู่ในตำแหน่งแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับแผ่นบิดที่สร้างขึ้นได้กำหนดอัตราส่วนการบิด (Twist ratio) อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$\text{Twist ratio} = \frac{M}{H} \quad (3.1)$$

โดยที่ M คือ ความยาวของเกลียว

H คือ ความสูงแผ่นบิด

สำหรับระดับของการหมุนควงของเจ็ทสามารถแสดงในรูปของสแควร์ลัมเบอร์โดยใช้สมการ (2.1) – (2.3) แต่เนื่องจากอิทธิพลของแผ่นบิดในท่อทำให้การไหลที่ปากทางออกซับซ้อน เพราะเกิดขึ้นขอบเขตการไหลบริเวณใกล้ผนังท่อเจ็ทและผิวแผ่นบิด ทำให้ความเร็วในแนวแกนและความเร็วเชิงมุมของเจ็ทไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดที่ทางออกของท่อเจ็ท และในทางปฏิบัติยากต่อการวัดการกระจายความเร็วที่ปากทางออก ดังนั้นในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานความเร็วในแนวแกน (V_n) และความเร็วเชิงมุม (ω) ของเจ็ทคงที่ตลอดที่ทางออกของท่อเจ็ท โดยที่สามารถคำนวณหาความเร็วเชิงมุมของเจ็ทตามสมการต่อไปนี้

$$\omega = \frac{2\pi n V_n}{l} \quad (3.2)$$

ในที่นี้ n คือ จำนวนเกลียว

l คือ ความยาวแผ่นบิด

V_n คือ ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท

จากสมการ (2.2) และ (2.3)

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

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

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

$$Sw = \frac{\pi n D}{2l} \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.5) พบว่าสเวิร์ลนัมเบอร์ไม่ขึ้นกับความเร็วของเจ็ท แต่อย่างไรก็ตาม สมการความสัมพันธ์ที่ได้ข้างต้นนี้ได้มาจากสมมุติฐาน ซึ่งเป็นค่าประมาณทางทฤษฎีเท่านั้น สำหรับสเวิร์ลนัมเบอร์จริงนั้นจำเป็นต้องหาจากการวัดการกระจายความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ ที่ปากทางออกของท่อเจ็ท ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนเกลียวที่ความยาวของแผ่นบิด 300 mm ค่าประมาณทางทฤษฎีของสเวิร์ลนัมเบอร์และอัตราส่วนการบิด (Twist ratio)

ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนเกลียวที่ความยาวของแผ่นบิด 300 mm สเวิร์ลนัมเบอร์ และอัตราส่วนการบิดของแต่ละแผ่นบิด

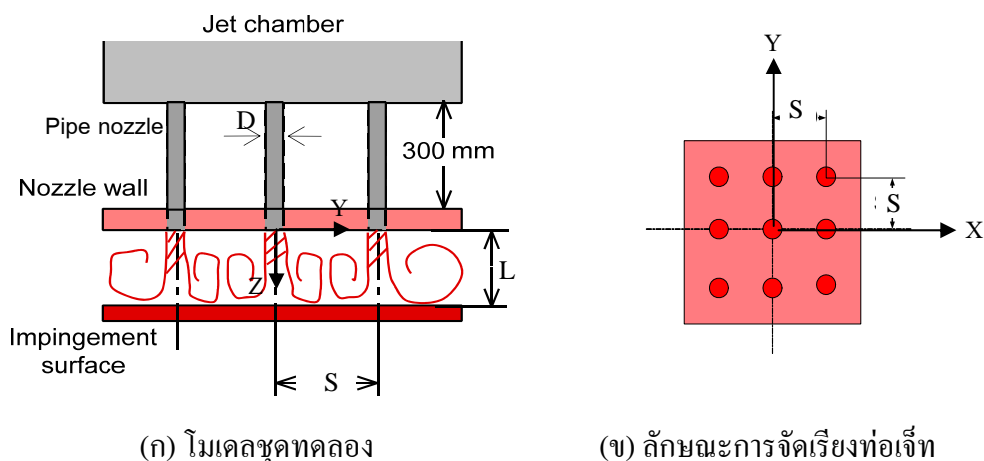
Number of pitch ($l=300\text{mm}$)	Swirl number	Twist ratio
0	0.00	0.00
5	0.40	3.64
8	0.62	2.27
10	0.78	1.82
12	0.94	1.52

3.2 รายละเอียดของชุดทดลอง

รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองและตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในกรณีที่เป็นกลุ่มของเจ็ท 9 ท่อ โดยกำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัด แกน X อยู่ในแนวตั้งฉากกับสันของแผ่นบิด แกน Y อยู่ในแนวเดียวกับที่เจ็ทไหล

ออกจากท่อ และแกน Z อยู่ในแนวเดียวกับสันของแผ่นบีด สำหรับชุดทดลองสามารถปรับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทได้ตามที่แสดงในรูปที่ 3.3

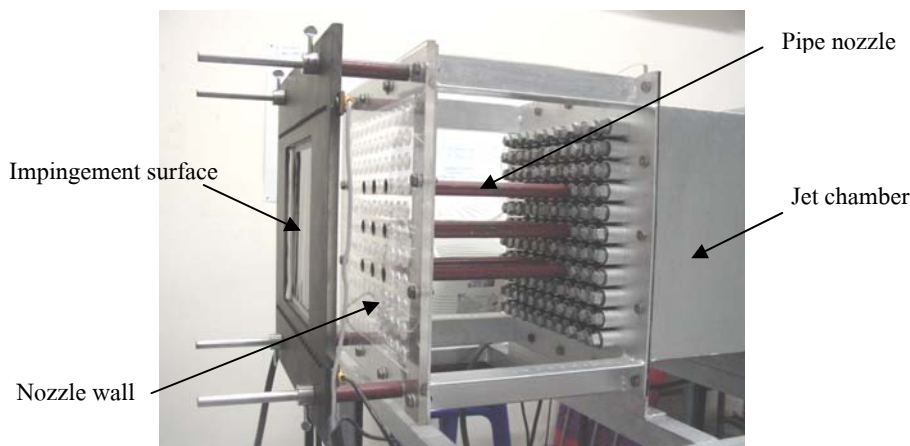
สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท $D=16.5$ mm ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D, 4D, 6D$ และ $8D$ สเวิร์ลนัมเบอร์ $Sw=0.00, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94$ และเจ็ทจากท่อเปล่า ในกรณีการทดลองเจ็ทลำเดียวจะใช้ท่อเจ็ทที่อยู่ตรงกลางเป็นหลักโดยนำท่อเจ็ทที่เหลือออกจากชุดทดลอง จากนั้นจึงทำการปิดรูตำแหน่งที่นำท่อเจ็ทออกด้วยการนำฝาปิดขันเปลี่ยนให้แน่น สำหรับการทดลองกรณีที่เป็นเจ็ทหมุนควงก็จะนำแผ่นบีดที่มีอัตราส่วนการบิดที่ค่าต่างๆสอดในท่อเจ็ท และนำท่อเจ็ทที่ได้สอดแผ่นบีดมาติดตั้งกับชุดทดลอง



(ก) โมเดลชุดทดลอง

(ข) ลักษณะการจัดเรียงท่อเจ็ท

รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลอง



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของชุดทดลอง

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (D)	16.5 mm
ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)	20,000
อุณหภูมิเจ็ท (T_j)	28.5 °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 $S=2D - 8D$ สำหรับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองได้เลือกค่าที่อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเพียงค่าเดียว เนื่องจากในงานวิจัยไม่ได้ศึกษาผลของตัวแปรเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ท

3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

3.3.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 3.4 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชน สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

(1) โบลเวอร์ (Blower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป่าอากาศให้เกิดการไหลในระบบ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 5 hp เป็นตัวขับเคลื่อนของโบลเวอร์ ซึ่งขนาดของกำลังที่ขับโบลเวอร์เพียงพอต่ออัตราการไหลในกรณีที่เป็นกลุ่มของเจ็ท 9 ท่อ สำหรับการปรับอัตราการไหลให้ได้ตามที่กำหนดจะใช้วิธีการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุม

(2) ออร์ริฟิซ (Orifice) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศจากผลต่างความดันสองจุด คือความดันของอากาศก่อนผ่านออร์ริฟิซและหลังผ่านออร์ริฟิซ โดยใช้मानอมิเตอร์ที่บรรจุน้ำเป็นของเหลววัดความดัน

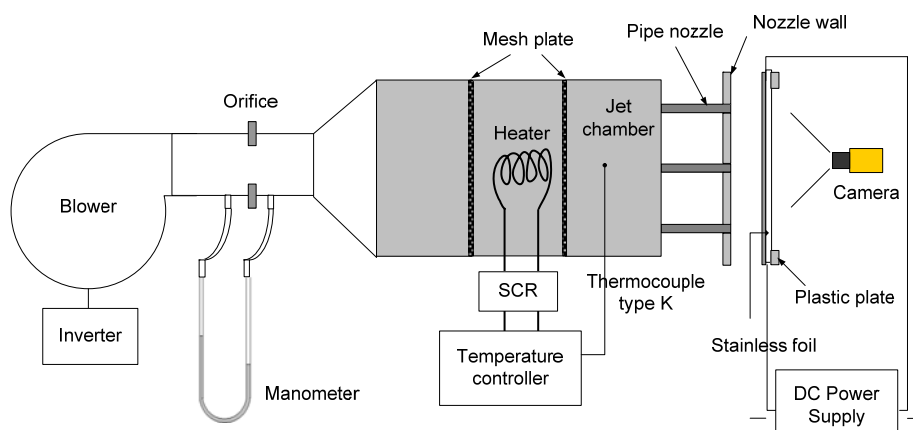
(3) ฮีตเตอร์และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Heater and Temperature controller) เป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศและควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทให้คงที่ ในการทดลองใช้ฮีตเตอร์

เป็นตัวให้ความร้อน จากนั้นทำการควบคุมฮีตเตอร์ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ได้อยู่ในช่วง $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$

(4) ห้องจ๊อทอากาศ (Jet chamber) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อเก็บรักษาความดันของอากาศให้คงที่ตลอดหน้าแปลนที่ติดตั้งท่อเจ็ท โดยด้านหน้าของห้องความดันจะติดตั้งข้อต่อเกลียวในไว้สำหรับติดตั้งท่อเจ็ทซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 11 แถว \times 11 แถว โดยที่ระยะห่างของข้อต่อเกลียวแต่ละอันที่วัดจากศูนย์กลางมีความกว้าง 2D (D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ทที่มีขนาด 16.5 mm) ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.3

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

(6) ผนังหัวฉีด (Nozzle wall) ติดตั้งขึ้นมาเพื่อจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิวให้อยู่ระหว่างผนังหัวฉีดและพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3.4 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

(7) แผ่นที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement plate) ในการทดลองจะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.03 mm เป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยแผ่นสแตนเลสจะถูกขึงให้เรียบติดกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 240 mm \times 240 mm ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองจะต่อเข้ากับขั้วของอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q} = \frac{I^2 R}{A} \quad (3.6)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส

A คือ พื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส

สำหรับการวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิกวิด คริสตัลติดด้านหลังของแผ่นสแตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่ใช้ ในการทดลองมีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสี จากไม่มีสี (สีดำ) เปลี่ยนเป็นสีแดง เหลือง เขียว และ น้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ 29-36 °C

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

(9) กล้องบันทึกภาพแบบดิจิทัล (Digital camera) สามารถบันทึกความละเอียด ของภาพ 640 × 480 จุด มีความละเอียดของสี 8 บิต

3.3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับ โบลเวอร์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่กำหนดโดยใช้อร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล จากนั้นอากาศจะไหล ผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ก่อนที่ จะเข้าห้องความดันและอากาศจะไหลออกมาทางท่อหัวฉีดพุ่งชนผนังที่ติดตั้งไว้ด้านหน้า หลังจาก นั้นเจ็ทก็จะไหลออกทางด้านข้างระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับค่าเรย์โนลด์ส์นัม เบอ์ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$Re = \frac{D\bar{V}_j}{\nu} \quad (3.7)$$

โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท

\bar{V}_j คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อเจ็ท

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของเจ็ท

ในการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน โดยการจ่ายฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นสแตนเลสสามารถคำนวณได้จาก สมการ (3.6) หลังจากเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการระบายความร้อนขึ้นบนแผ่นสแตนเลสทำให้แผ่น

เทอร์โมลิวิดคริสตัลที่ติดด้านหลังแผ่นสแตนเลสเกิดการเปลี่ยนสี จากนั้นทำการบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_j} \quad (3.8)$$

โดยที่ \dot{q} คือ ฟลักซ์ความร้อน
 T_w คือ อุณหภูมิของพื้นผิวฟุ้งชนที่วัดจากแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัล
 T_j คือ อุณหภูมิของเจ็ท

จากสมการที่ (3.8) สามารถคำนวณหาตัวเลขดัชนีมอร์บนพื้นผิวได้จากความสัมพันธ์

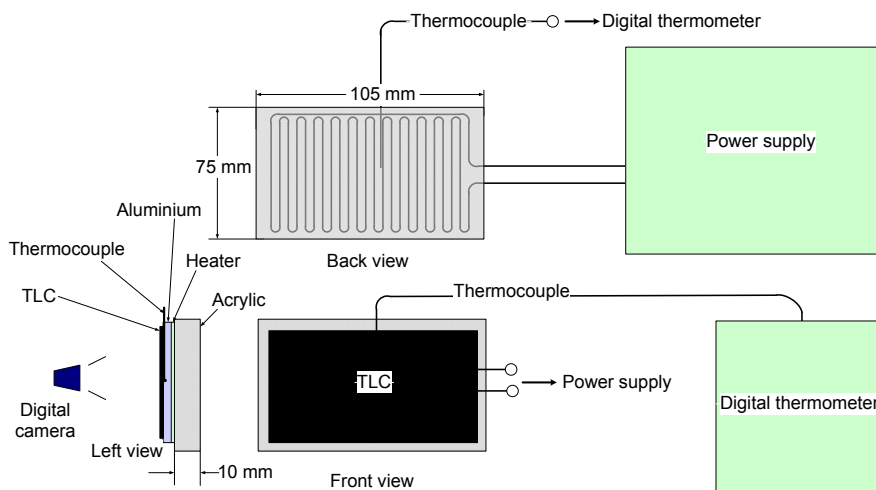
$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.9)$$

ในที่นี้ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล

สำหรับเส้นแถบแต่ละสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลจะเป็นเส้นแถบของแต่ละอุณหภูมิหรือเส้นอุณหภูมิกงที่ (Isotherm) และเนื่องจากค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจากสมการ (3.8) เส้นแถบแต่ละสีจะเป็นเส้นที่มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เท่ากัน

แผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลที่เลือกใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสีจากไม่มีสี (สีดำ) สีแดง สีเหลือง สีเขียวและสีน้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ 29 °C ถึง 36 °C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลและได้ใช้เทคนิคการประมวลภาพในการเปลี่ยนข้อมูลสีที่บันทึกด้วยกล้องดิจิทัลเป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก คือ R (แดง) G (เขียว) และ B (น้ำเงิน) เพื่อเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการประมาณค่าอุณหภูมิจากสีที่ปรากฏขึ้นซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.3.3 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล

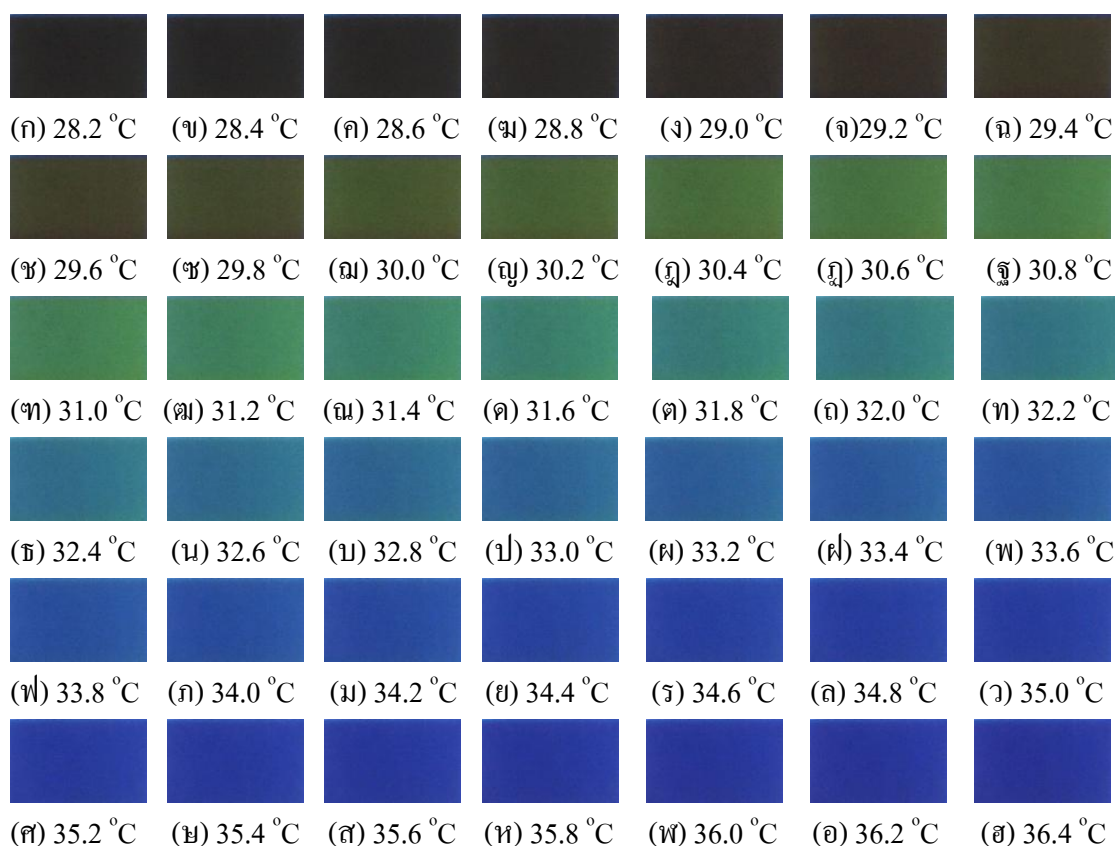


รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล

ในการใช้แผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว จำเป็นที่จะต้องทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลก่อนใช้งาน รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบสี โดยมีแผ่นฮีตเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใสมีขนาดความกว้าง 75 mm ยาว 105 mm และหนา 10 mm ขั้วของฮีตเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีตเตอร์จะติดแผ่นอลูมิเนียมบางซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีตเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลที่มีขนาดความกว้าง 47 mm ยาว 70 mm เพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล สำหรับแผ่นอลูมิเนียมได้เจาะรูสำหรับติดสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ ในการสอบเทียบสีนั้นได้กำหนดเงื่อนไขให้เหมือนกับสถานะในการทดลองจริง เช่น การให้แสงและระยะห่างของกล้องบันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $28.2 - 36.4^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลไม่แสดงสีจนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม

สำหรับขั้นตอนในการสอบเทียบสีนั้นได้จัดอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาพเดียวกับการทดลองจากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิบนแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 38°C ซึ่งแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลจะแสดงสีน้ำเงินเข้ม จากนั้นรอให้อุณหภูมิบนแผ่นอลูมิเนียมมีค่าคงที่ จึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6 (ฮ) และทำซ้ำลักษณะเดียวกัน โดยลดอุณหภูมิบนแผ่นอลูมิเนียมลงครั้งละ 0.2°C จนถึงอุณหภูมิที่แผ่นเทอร์โม

ลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี (สีดำ) ก็จะได้รูปการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งหมดตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบสีแต่ละภาพมาแยกให้อยู่ในระบบสี RGB จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบของสี โดยกำหนดให้อยู่ในรูปความเข้มของสี (Color intensity) ที่เป็นตัวแปรไร้มิติตามสมการต่อไปนี้

$$r = \frac{R - RB}{R_{\max} - RB} \quad (3.10)$$

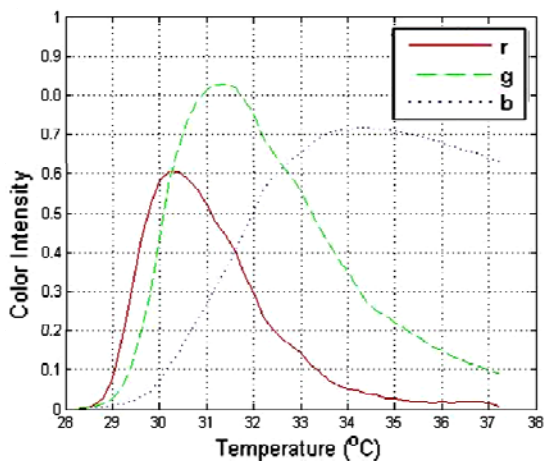
$$g = \frac{G - GB}{G_{\max} - GB} \quad (3.11)$$

$$b = \frac{B - BB}{B_{\max} - BB} \quad (3.12)$$

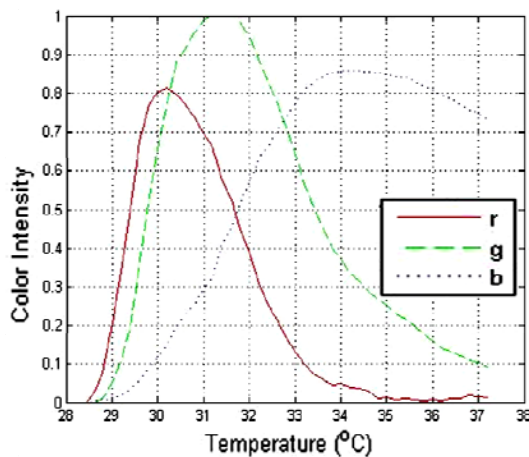
- ในที่นี้ R คือ ความเข้มของสีแดงของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล
- G คือ ความเข้มของสีเขียวของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล
- B คือ ความเข้มของสีน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล
- R_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีแดงที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ
- G_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีเขียวที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ
- B_{max} คือ ความเข้มสูงสุดของสีน้ำเงินที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ
- RB คือ ความเข้มของสีแดงที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลไม่แสดงสี
- GB คือ ความเข้มของสีเขียวที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลไม่แสดงสี
- BB คือ ความเข้มของสีน้ำเงินที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลไม่แสดงสี

จากสมการที่ (3.10) - (3.12) ก็จะหาค่าเฉลี่ยความเข้มของสีในรูป 3.6 ทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม MATLAB ตามที่ได้แสดงในภาพผนวก กข. 1 จากนั้นสร้างกราฟโดยให้แกนอนแสดงระดับของอุณหภูมิและแกนตั้งแสดงความเข้มของส่วนประกอบสี rgb จะได้ความสัมพันธ์ของกราฟตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.7

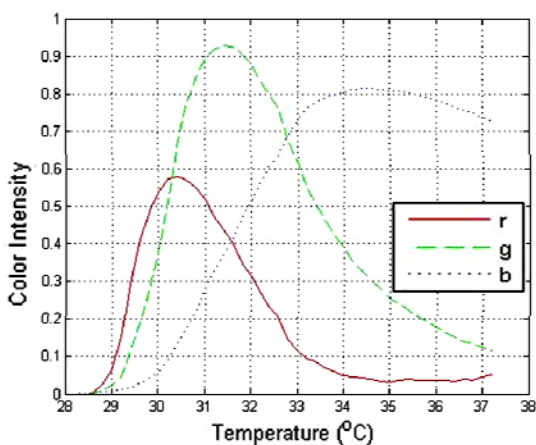
จากกราฟที่ได้แสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิที่ 28.2°C เป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลยังไม่ได้แสดงสี (สีดำ) เมื่อทำการแยกตัวประกอบของสี rgb ตัวประกอบของสีทั้งหมดก็จะเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลจะเริ่มแสดงสีทำให้สามารถแยกตัวประกอบสี rgb ได้ ซึ่งจากผลการสอบเทียบทั้งหมดหาค่า พบว่าเส้นกราฟ r และ g จะตัดกันที่อุณหภูมิ $30.2 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิดังกล่าวพบว่าแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลมีสีเหลืองตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6 (ญ) ในงานวิจัยนี้จะใช้เงื่อนไขเส้นสีเหลืองที่มีส่วนประกอบของสี r ที่มีค่าเท่ากับสี g ที่อุณหภูมิเท่ากับ 30.2°C เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวต่อไป



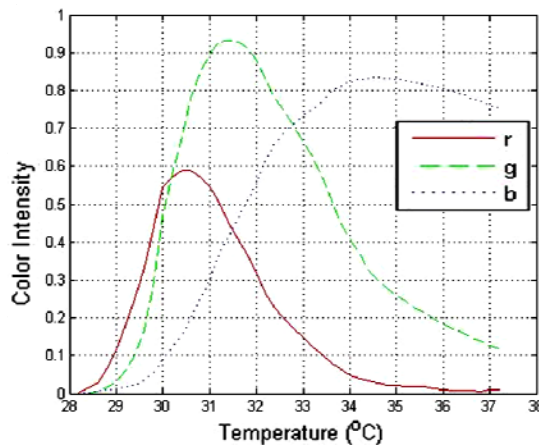
(ก) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 1



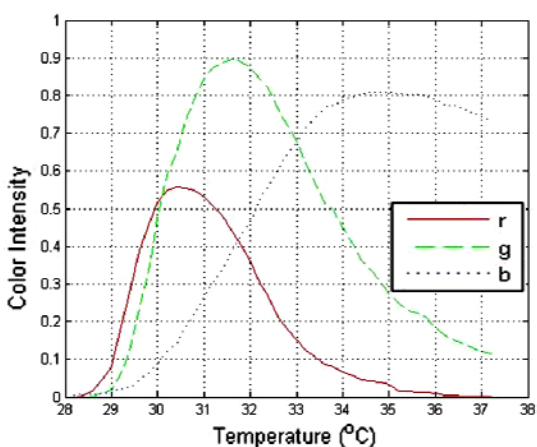
(ข) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 2



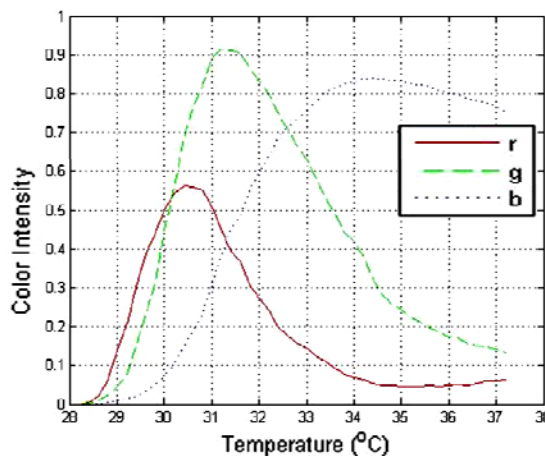
(ค) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 3



(ง) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 4



(จ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 5



(ฉ) ผลการสอบเทียบสีครั้งที่ 6

รูปที่ 3.7 แสดงกราฟการแยกตัวประกอบสี rgb จากแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

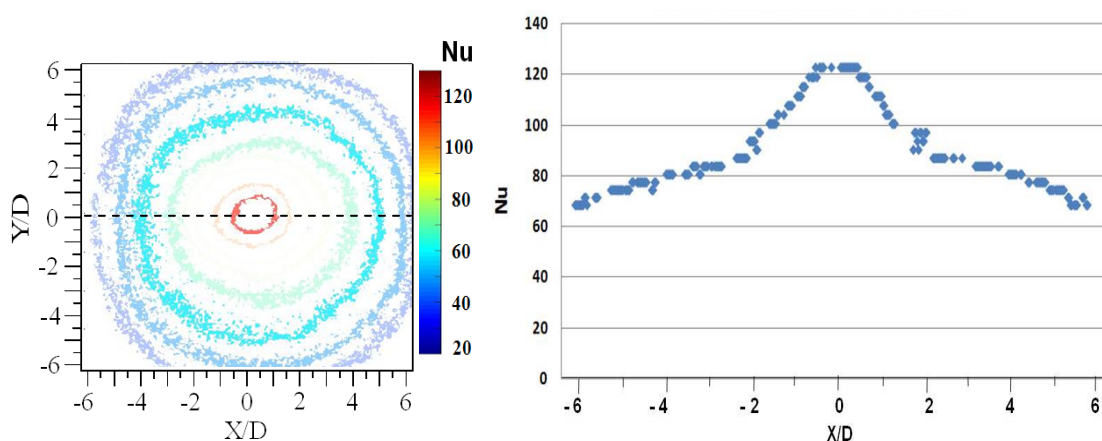
3.3.4 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

ตารางที่ 3.3 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ภาพแผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

\dot{q} (W/m ²)	h^* (W/m ² °C)	Nusselt Number*	รูปก่อนผ่านการ ประมวลภาพ	รูปหลังผ่านการ ประมวลภาพ **	ลักษณะเส้นสีที่ นำมาซ้อนกัน
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 ($T_w=30.2^\circ\text{C}$, $T_f=28.5^\circ\text{C}$)

** เส้นสีขาวแสดงเส้นสีที่มีอุณหภูมิ 30.2°C ซึ่งมีเงื่อนไขค่า r เท่ากับค่า g ใช้สำหรับแทนนัสเซลด์นัมเบอร์



(ก) การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว

(ข) การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์

ตามเส้นประในรูป 3.8 (ก)

รูปที่ 3.8 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ได้จากการประมวลผลภาพด้วยเทคนิค

การวิเคราะห์ภาพ ($T_j=28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_w=30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$)

ตารางที่ 3.3 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ โดยที่ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่หนึ่งเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณจากสมการ (3.6) ค่าจากตารางในคอลัมน์ที่สองเป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคำนวณจากสมการ (3.8) และค่าจากตารางในคอลัมน์ที่สามเป็นนัสเซิลต์นัมเบอร์คำนวณจากสมการ (3.9) ในกรณีที่ใช้เส้นสีเหลือง $T_w=30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของเจ็ท $T_j=28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในการคำนวณ

สำหรับวิธีการวัดอุณหภูมิด้วยแผ่นเทอร์โมลิวคิวิตีสามารถห่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว โดยใช้วิธีการเลื่อนเส้นสีที่รู้อุณหภูมิ (เส้นสีเหลืองแสดงอุณหภูมิเท่ากับ $30.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามที่ได้กล่าวหัวข้อ 3.3.3) ให้กระจายทั่วทั้งพื้นผิว สำหรับวิธีการเลื่อนเส้นสีที่รู้อุณหภูมิสามารถทำได้โดยการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนโดยให้เส้นสีที่รู้อุณหภูมิเลื่อนทั่วทั้งพื้นผิวตามที่ได้แสดงตัวอย่างของผลการทดลองในคอลัมน์ที่สี่ของตารางที่ 3.3 ในการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวก็จะทำการเพิ่มกระแสไฟที่จ่ายให้แผ่นสแตนเลสเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 A

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ทำการตัดรูปที่ปรากฏเป็นแผ่นเทอร์โมลิวคิวิตีให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์
- (2) สร้างเงื่อนไขที่ r มีค่าใกล้เคียงค่า g ($|r-g|\leq 0.01$) จากนั้นให้คอมพิวเตอร์เลือกจุดสีที่มีเงื่อนไขข้างต้น
- (3) คำนวณนัสเซิลต์นัมเบอร์ของจุดสีตามเงื่อนไขข้อ (2)

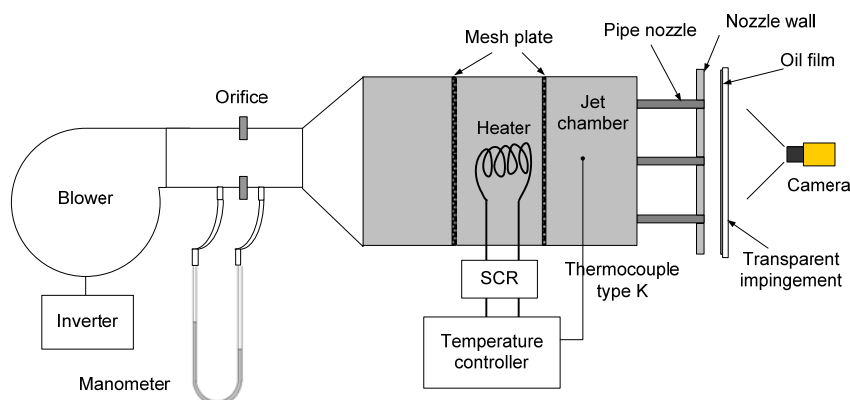
- (4) ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ (1) – (3) ของรูปทั้งหมด จากนั้นนำนําสีเคล็ด้น้บอร์ทั้งหมดมาซ้อนกันตามที่ได้แสดงในตาราง 3.3

จากขั้นตอนข้างต้นก็จะได้นําสีเคล็ด้น้บอร์ที่กระจายตามจุดต่างๆซึ่งผลการทดลองอาจจะแสดงให้อยู่ในรูปความเข้มของสีตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.8 (ก) หรืออาจจะแสดงที่พิกัดต่างๆตามแกน X หรือ Y ที่อยู่ในรูปกราฟความสูงของนําสีเคล็ด้น้บอร์ สำหรับรูปที่ 3.8 (ข) เป็นการแสดงกราฟความสูงของนําสีเคล็ด้น้บอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่พิกัด $Y/D=0$ ตามเส้นประในรูป 3.8 (ก) อย่างไรก็ตามจากตัวอย่างที่ได้แสดงเพื่อให้เข้าใจได้ง่าย สำหรับวิธีการหานําสีเคล็ด้น้บอร์ที่กระจายบนพื้นผิว จึงเลือกปลั๊กความร้อนที่เพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 1 A แต่ในการทดลองจริงจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าครั้งละ 0.5 A

3.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว

3.4.1 ชุดทดลอง

รูปที่ 3.9 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิว ได้นำชุดทดลองเดิมที่ใช้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวมาประยุกต์ใช้ โดยเปลี่ยนแผ่นที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งจากเดิมเป็นแผ่นสแตนเลสบางมาเป็นแผ่นพลาสติกใส เพื่อทาฟิล์มน้ำมันบางบนแผ่นพลาสติกใสด้านที่เจ็ทพุ่งชน เมื่อเจ็ทไหลพุ่งชนฟิล์มน้ำมันก็จะเกิดการไหลบนพื้นผิว ทำให้สามารถเห็นลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้



รูปที่ 3.9 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิว

3.4.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้นำแผ่นพลาสติกใสด้านที่เจ็ทพุ่งชนทาด้วยน้ำมันสีขาว่ามีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลว ผงไททาเนียมไดออกไซด์และกรดโอล์กเป็นฟิล์มบางๆทั่วทั้ง

พื้นผิว จากนั้นจึงนำแผ่นพลาสติกใสมาติดตั้งเข้ากับชุดทดลองเป็นระนาบที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับผนังด้านที่เจ็ทพุ่งชนได้ทำสีดำเพื่อให้สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพาดพาฟิล์มน้ำมันออกจากพื้นผิวได้ชัดเจน หลังจากเจ็ทเริ่มไหลพุ่งชนฟิล์มน้ำมันก็จะทำการบันทึกภาพการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวจากด้านหลังของแผ่นพลาสติกใส โดยใช้กล้องดิจิทัลบันทึกการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่างๆ

3.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน

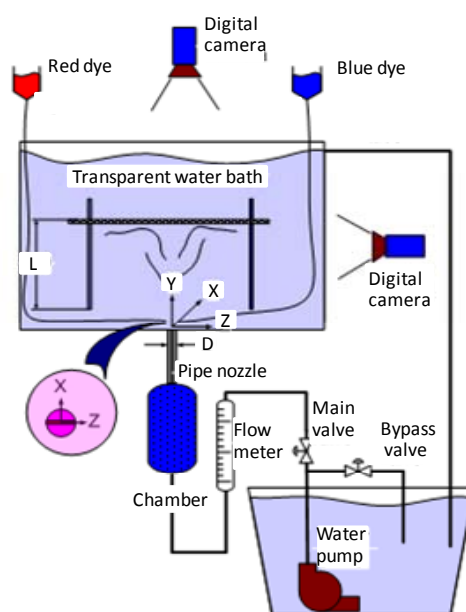
สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำผลจากการศึกษามาใช้ในการอธิบายลักษณะโครงสร้างการไหลและกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควง โดยเลือกเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ $Re=760$ ซึ่งเป็นช่วงความเร็วในการไหลของเจ็ทที่สามารถสังเกตลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทได้ชัดเจน และไม่ทำให้เส้นสีที่ฉีดเข้าไปในกระแสน้ำไหลที่ตำแหน่งปากทางออกของท่อเจ็ทเกิดการแตกตัว สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำได้แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (D)	16.5 mm
เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)	760
อุณหภูมิเจ็ท (T_j)	30 °C
สเวิร์ลนัมเบอร์ (Sw)	0.00, 0.40, 0.62, 0.78, 0.94 และ เจ็ทจากท่อเปล่า
ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L)	2D, 4D, 6D, 8D และ 10D

รูปที่ 3.10 แสดงชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ โดยตู้น้ำที่ใช้ในการศึกษาทำจากแผ่นพลาสติกใสเพื่อให้สามารถสังเกตการไหลของเจ็ทน้ำได้ มีขนาดความกว้าง 60 cm ยาว 62 cm และสูง 50 cm ในการทดลองเจ็ทน้ำจะถูกส่งจากถังเก็บน้ำด้านล่างโดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 250 วัตต์ หลังจากนั้นน้ำจะไหลผ่านวาล์วปรับอัตราการไหลและอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบลูกลอยไปยังถังพักน้ำและท่อเจ็ท โดยเจ็ทน้ำจะไหลออกจากท่อเจ็ทที่ต่อเข้ากับบริเวณตรงกลางของผนังด้านล่างของตู้น้ำ โดยท่อเจ็ทที่ใช้มีขนาดเท่ากับกรณีที่ใช้ศึกษาเจ็ทอากาศ ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจะติดตั้งแผ่นเรียบที่ทำจากแผ่น

พลาสติกใสหนา 10 mm เหนือปากทางออกของท่อเจ็ท โดยที่แผ่นเรียบที่ใช้สำหรับเป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสามารถปรับระยะห่างจากปากทางออกขังเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) และเมื่อต้องการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระจะนำแผ่นพลาสติกที่เจ็ทพุ่งชนออกจากตู้ น้ำ จากรูปที่ 3.10 กำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัด และให้แกน X อยู่ในแนวตั้งฉากกับสันของแผ่นบีด แกน Y อยู่ในแนวเดียวกับที่เจ็ทไหลออกจากท่อ และแกน Z อยู่ในแนวเดียวกับสันของแผ่นบีด

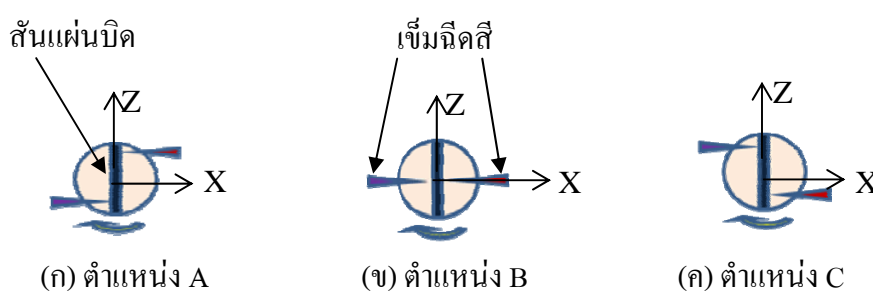


รูปที่ 3.10 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน จะแบ่งเป็นสองวิธีคือ วิธีแรกศึกษาลักษณะการกระจายของเจ็ท โดยใช้วิธีผสมสีชมพูแดงลงไปในถังน้ำด้านล่างของชุดทดลองแล้วฉีดเจ็ทที่มีสีชมพูแดงลงไปในน้ำใสที่อยู่ในตู้ น้ำ ซึ่งวิธีนี้จะสังเกตได้เพียงลักษณะการกระจายของเจ็ทเท่านั้น ส่วนวิธีที่สองศึกษาลักษณะโครงสร้างการไหลภายในเจ็ท โดยวางเข็มฉีดยาที่ตำแหน่งปากทางออกของท่อเจ็ท แล้วดูดน้ำใสจากถังน้ำด้านล่างของชุดทดลองและฉีดเจ็ทน้ำลงไปใสที่อยู่ในตู้ น้ำ จากนั้นก็ฉีดสีเข้าไปในกระแสน้ำไหลของเจ็ทน้ำที่ปากทางออก แล้วดูเส้นทางการไหลของสีในกระแสน้ำไหลของเจ็ท กรณีที่ต้องการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระก็จะนำแผ่นพลาสติกใสที่ใช้สำหรับเจ็ทพุ่งชนออก ในการทดลองได้วางเข็มฉีดยา 3 ลักษณะที่ปากทางออกของท่อเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในการติดตามดูเส้นทางการไหลของสีในแต่ละด้าน

(ด้านซ้ายและด้านขวาระหว่างแผ่นปิดที่ปากทางออกของท่อเจ็ท) ได้ใช้สีที่ฉีดเข้าไปแต่ละด้านที่แตกต่างกัน โดยเข็มที่อยู่ด้านขวาจะใช้สีชมพูแดงและเข็มที่อยู่ด้านซ้ายจะใช้สีน้ำเงิน

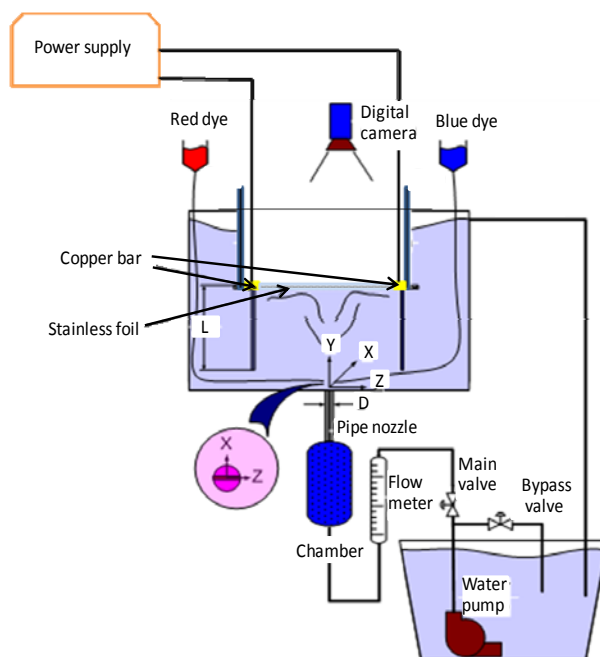
สำหรับชุดทดลองการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ ได้ติดตั้งกล้องบันทึกภาพแบบดิจิทัลและหลอดไฟให้แสงสว่างโดยตำแหน่งการติดตั้งกล้องบันทึกภาพมีอยู่สองตำแหน่ง คือ ด้านข้างและด้านบนของคูน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยที่ตำแหน่งของกล้องที่อยู่ด้านข้างจะจับภาพการไหลของเจ็ทตามแนวแกน และกล้องที่อยู่ด้านบนจะจับภาพการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3.11 ลักษณะการวางเข็มสีที่ปากทางออกของท่อเจ็ทแต่ละแบบ

3.6 การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว

รูปที่ 3.12 แสดงชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว โดยใช้ชุดทดลองชุดเดิมที่ได้ใช้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน โดยเปลี่ยนผนังที่เจ็ทพุ่งชนจากแผ่นเรียบธรรมดาเป็นกล่องสี่เหลี่ยมก้นน้ำ โดยด้านล่างของกล่องสี่เหลี่ยมเป็นพื้นผิวใช้สำหรับเจ็ทพุ่งชนซึ่งเจาะหน้าต่างขนาด 200 mm x 200 mm ไว้กึ่งกลางแผ่น และใช้แผ่นสแตนเลสบางที่มีความหนา 0.03 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสแตนเลสจะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนาที่เจาะหน้าต่าง โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองจะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟกระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสจะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส สำหรับขั้นตอนการทดลองจะเหมือนกับการทดลองการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศ



รูปที่ 3.12 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำบนพื้นผิว

บทที่ 4

ผลการทดลอง

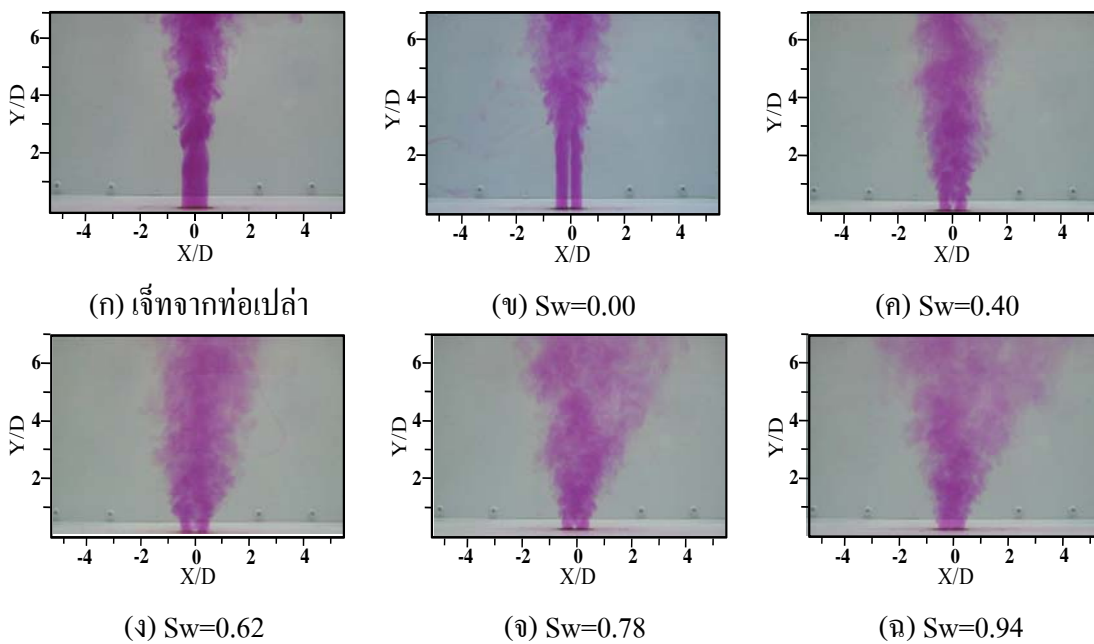
สำหรับผลการทดลองในส่วนแรกจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว โดยนำผลจากการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทในน้ำด้วยวิธีเชิงทัศนศาสตร์มาอธิบายกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน จากนั้นจะอธิบายถึงผลกระทบจากระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ ในส่วนที่สองจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท และอธิบายถึงผลกระทบจากระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทและสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

4.1 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว

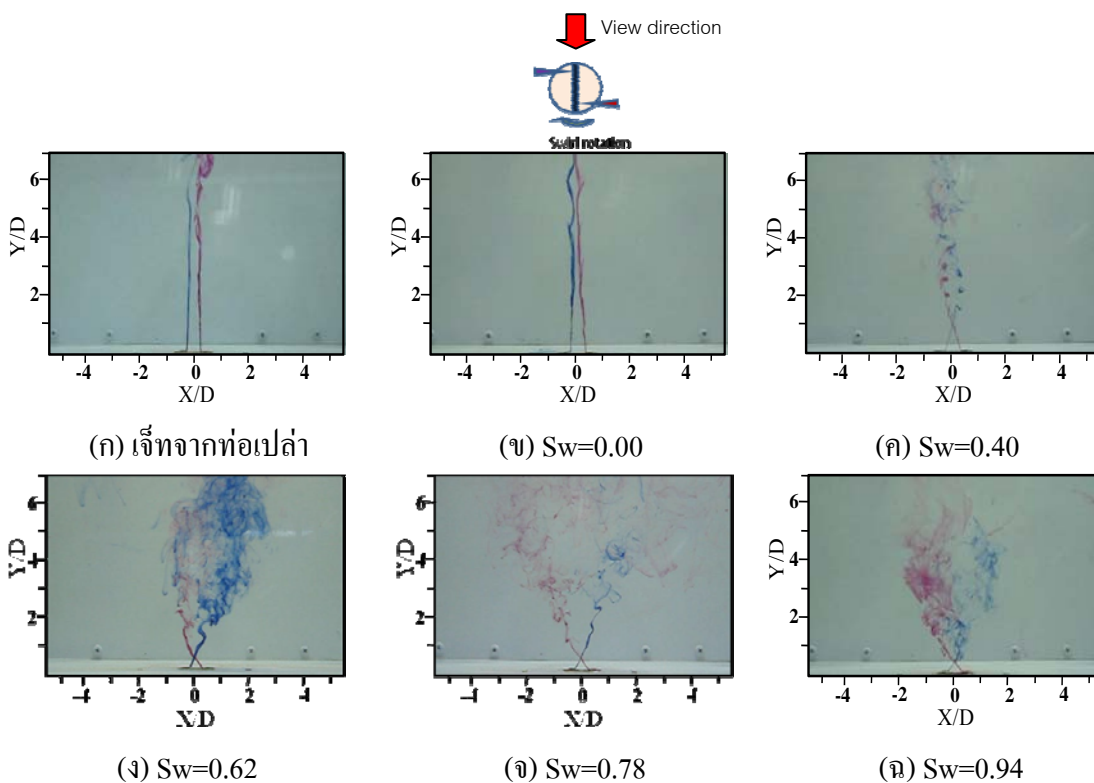
สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว โดยในส่วนแรกจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ เพื่อให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควง จากนั้นจะอธิบายถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ และสุดท้ายจะเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทน้ำและเจ็ทอากาศเพื่ออธิบายกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างเจ็ทน้ำและเจ็ทอากาศที่มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสอดคล้องกัน

4.1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระ

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



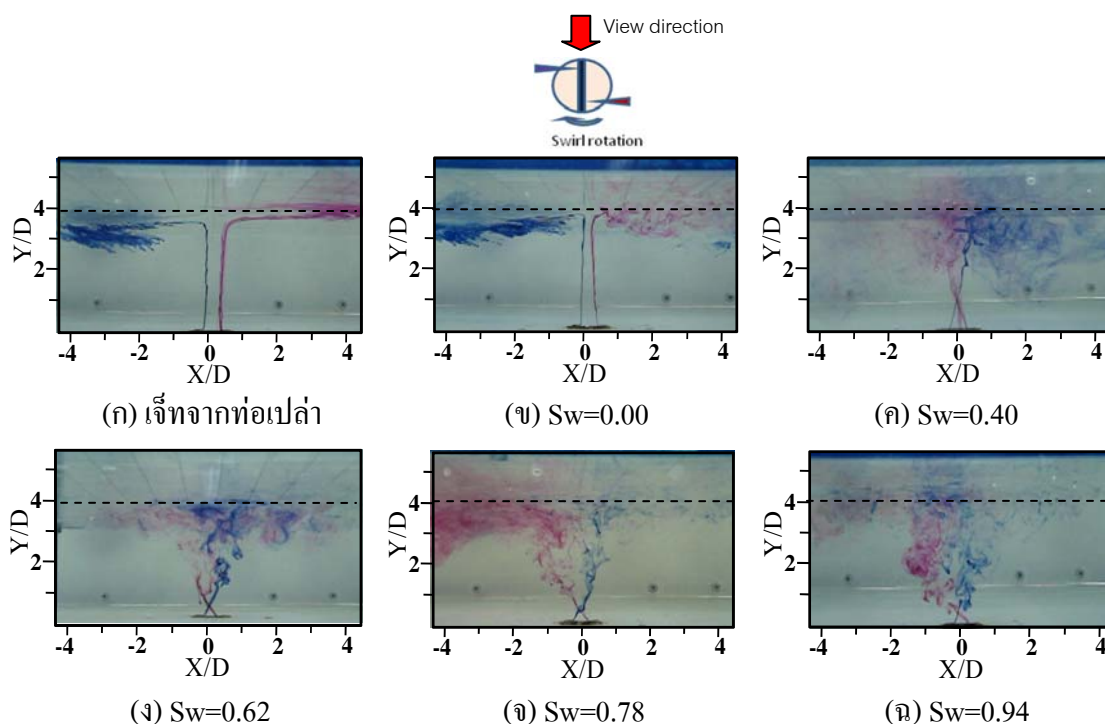
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการแพร่กระจายของเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขเลขเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ($Re=760$)



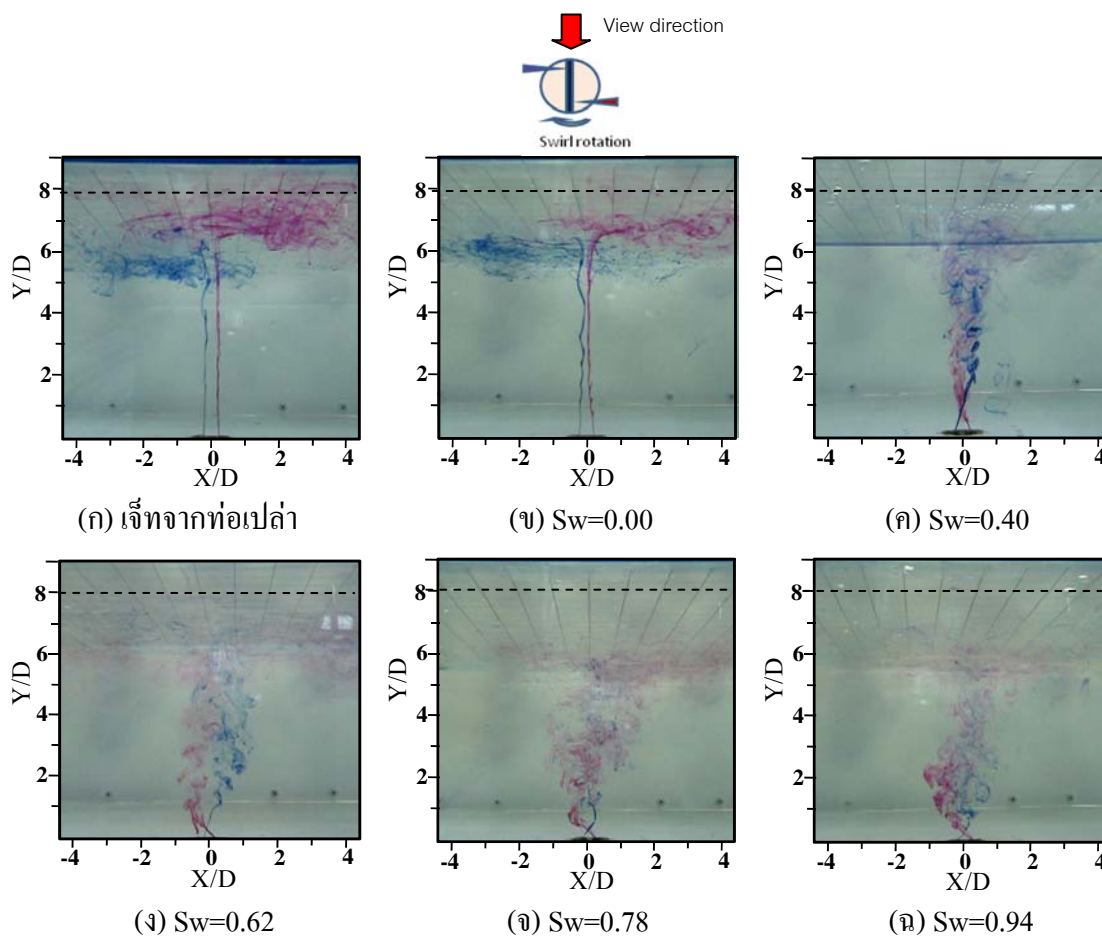
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขเลขเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ($Re=760$)

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างการไหลภายในเจ็ทน้ำอิสระที่เงื่อนไขสวิตช์ล้นมเบอร์ต่างๆ ในแต่ละรูปได้วางเข็มทิศในตำแหน่ง C ที่ปากทางออกเจ็ท ในรูปเส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านขวามือของสันแผ่นบิดจะมีสีชมพูแดงและเส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านซ้ายมือจะมีสีน้ำเงิน จากผลการทดลองพบว่า เส้นทางการไหลของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ การไหลของเจ็ทอยู่ในแนวแกนเท่านั้น ในขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 สวิตช์ล้นมเบอร์มีผลต่อมุมของเส้นทางการไหลที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ท เมื่อสวิตช์ล้นมเบอร์เพิ่มขึ้นมุมของเจ็ทที่กระทำกับแนวแกนของเจ็ท (แกน Y) เพิ่มขึ้นตามลำดับ มีผลทำให้การกระจายของเจ็ทเพิ่มขึ้นและเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่ในบริเวณรอบๆ มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.1 และ 4.2 ที่เงื่อนไขสวิตช์ล้นมเบอร์เดียวกันพบว่า การแพร่กระจายและโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระมีความสอดคล้องกัน

4.1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิว



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

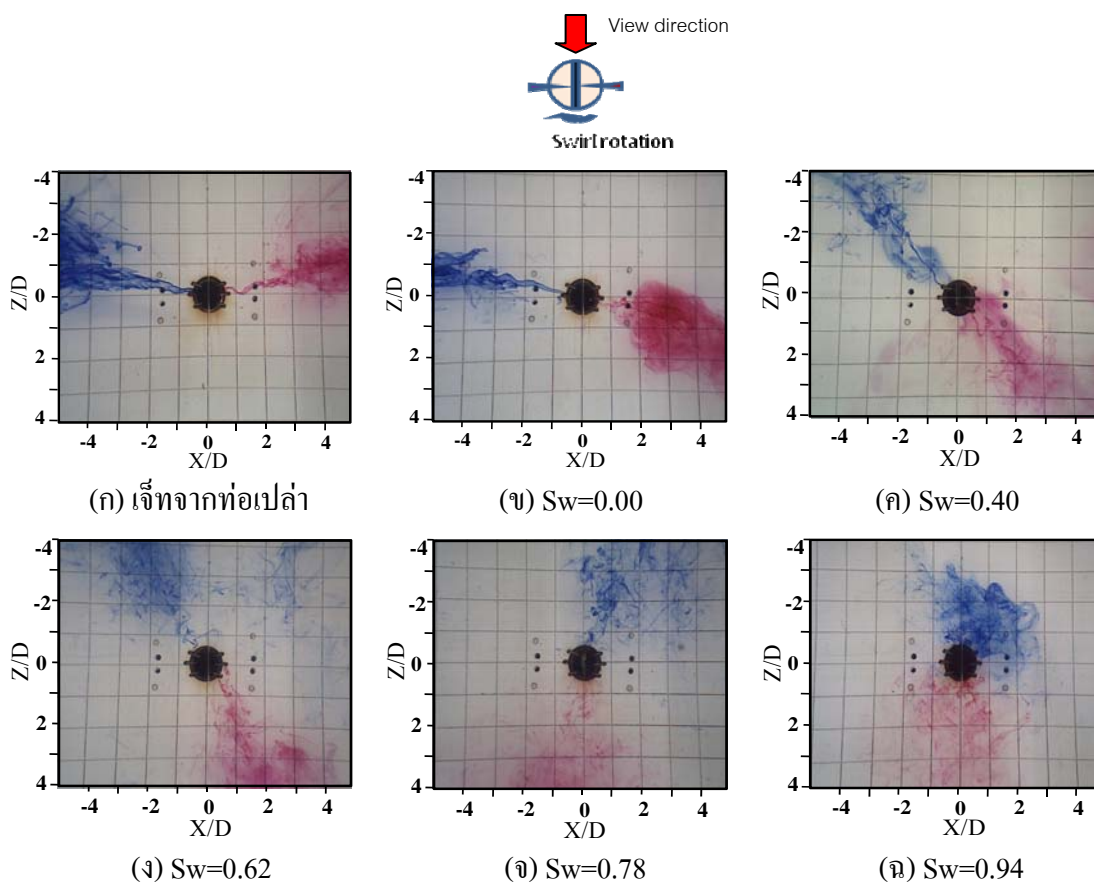


รูปที่ 4.4 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=8D$ ($Re=760$, วางเข็มตำแหน่ง C, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีต่อเส้นทางไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ และ $8D$ ตามลำดับ ในแต่ละรูปได้วางเข็มจุดสีในตำแหน่ง C โดยที่เส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านขวามือของสันแผ่นบิคจะมีสีชมพูแดง และเส้นสีจากเข็มที่อยู่ด้านซ้ายมือจะมีสีน้ำเงิน

รูปที่ 4.3 กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ พบว่าเส้นทางไหลของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ก่อนที่เจ็ทจะไหลพุ่งชนพื้นผิว การไหลของเจ็ทอยู่ในแนวแกน Y เท่านั้น หลังจากเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว เจ็ทจะไหลออกบนพื้นผิวตามแนวรัศมี ในขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 ก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว เจ็ทจะเกิดการหมุนควงและขยายตัวก่อนพุ่งชนพื้นผิวเป็นบริเวณกว้างขึ้น และระยะห่างระหว่างตำแหน่งของเส้นสีแต่ละด้าน (ด้านซ้ายและด้านขวาของแผ่นบิค) ที่พุ่งชนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้น

ตามสวิตช์ล้นน้ำเบอร์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สามารถสังเกตบริเวณที่เกิดการผสมกันระหว่างเส้นสีน้ำเงินและเส้นสีชมพูแดงขึ้น ซึ่งในบริเวณดังกล่าวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว สำหรับกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น $L=8D$ (รูปที่ 4.4) พบว่า เมื่อเพิ่มสวิตช์ล้นน้ำเบอร์จะทำให้เจ็ทเกิดการผสมกับน้ำที่อยู่รอบๆมากขึ้น ทำให้การพุ่งชนของเจ็ทบนพื้นผิวลดลงโดยเฉพาะที่เงื่อนไข $Sw=0.62, 0.78$ และ 0.94



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

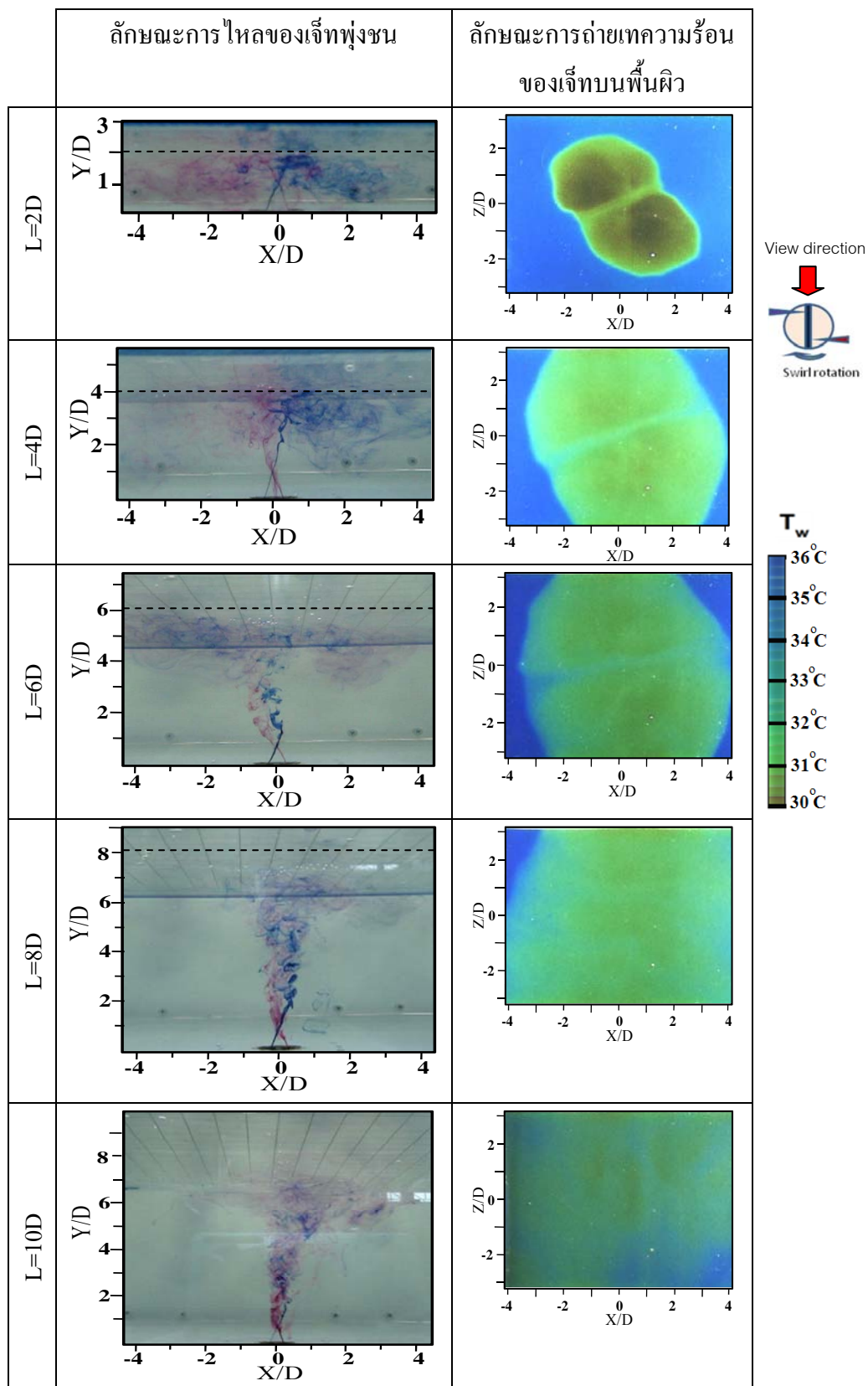
รูปที่ 4.5 แสดงผลของสวิตช์ล้นน้ำเบอร์ที่มีต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ ในรูปเข็มฉีดยาสีวางอยู่ในตำแหน่ง B และถ่ายภาพจากด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากผลการทดลองพบว่าสวิตช์ล้นน้ำเบอร์มีผลต่อเส้นทางการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ (รูปที่ 4.5 (ก) และ (ข)) เส้นสีไหลบนพื้นผิวตามแนวแกน X ไปทางด้านซ้ายและขวา แสดงถึงหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

เจ็ทจะไหลแพร่กระจายตามแนวรัศมีบนพื้นผิวเท่านั้น กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ (รูปที่ 4.5 (ค)) การไหลของเส้นสปีบนพื้นผิวแยกออกในแนวรัศมีทำมุมกับแนวแกน X ตามเข็มนาฬิกา ประมาณ 45° และเมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทเพิ่มมากขึ้น มุมที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวทำมุมกับแนวแกน X เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงสเวิร์ลนัมเบอร์มีผลต่อการไหลของเจ็ท

4.1.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำ

รูปที่ 4.6 ด้านซ้ายมือแสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำบนพื้นผิวและด้านขวามือแสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่แสดงบนแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัลที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ พลิกซ์ความร้อนบนพื้นผิวมีค่าคงที่เท่ากับ 447 W/m^2 จากรูปพบว่า ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ เจ็ทจะไหลออกจากหัวฉีดและพุ่งชนพื้นผิวทันที และกรณีในระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทกับน้ำที่อยู่รอบๆมากขึ้น ทำให้โมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง

สำหรับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงแยกออกเป็นสองบริเวณที่ห่างจากกันเพียงทำมุมกับแกน X กรณีในระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวขยายเป็นบริเวณกว้างขึ้น แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับกรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ เนื่องจากโมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง เช่นเดียวกับที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=6D$ และ $8D$ พบว่าบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวขยายเพิ่มขึ้นแต่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง และที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=10D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างที่จะต่ำมากเมื่อเทียบกับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ เนื่องจากโมเมนต์ที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างซับซ้อนตามลักษณะการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว



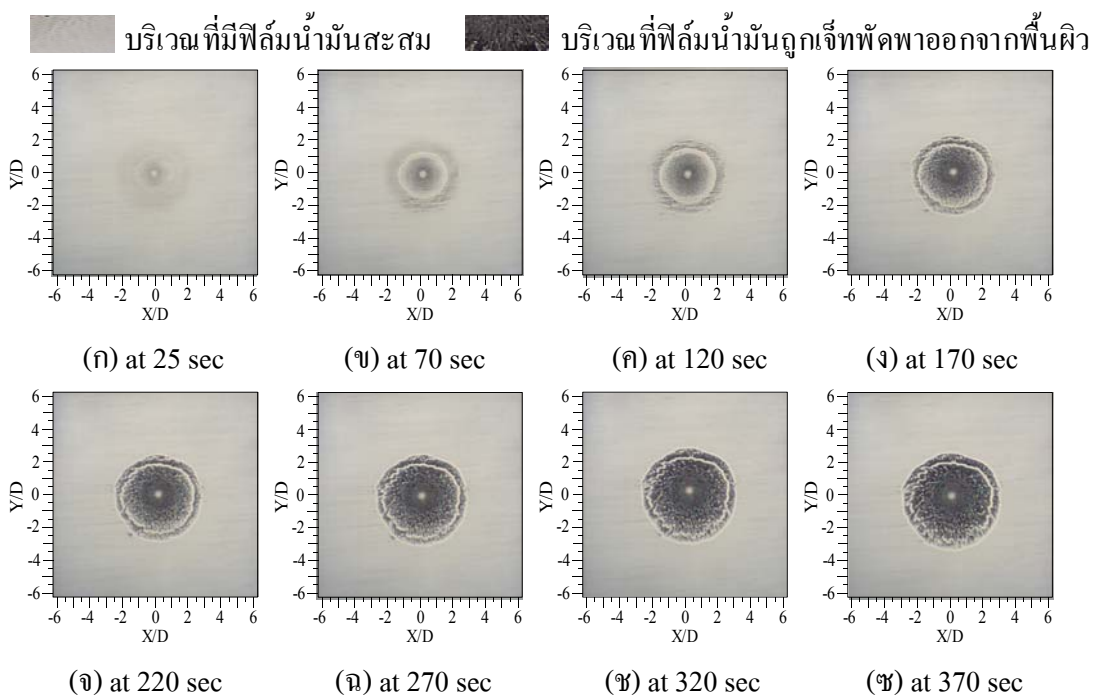
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข

$$Sw=0.40 \quad (\dot{q}=447 \text{ W/m}^2, T_j=30^\circ\text{C}, Re=760)$$

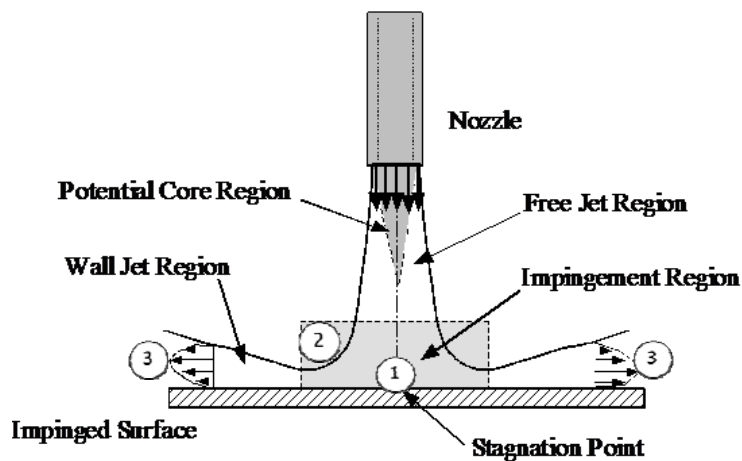
4.1.4 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศลำเดี่ยว

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) เนื่องจากการไหลบนพื้นผิวมีความเร็วเกิดขึ้นและมีความเค้นเฉือนบนพื้นผิวที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนพื้นผิว ในบริเวณดังกล่าวฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำซึ่งเป็นบริเวณที่ 3 ของรูปที่ 4.8)

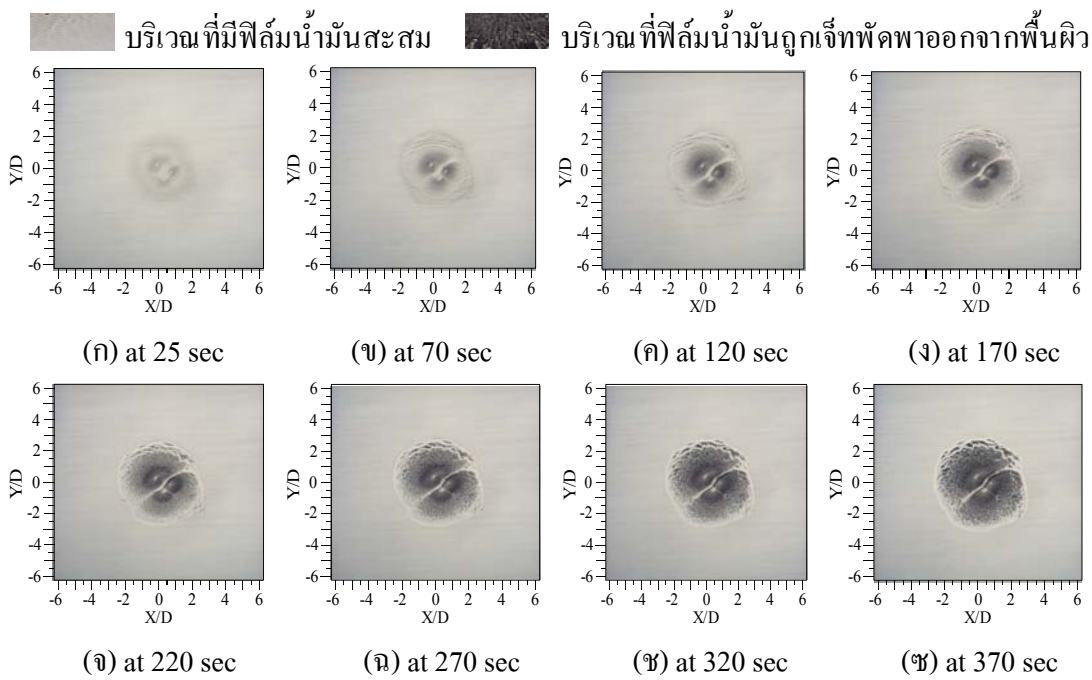
สำหรับรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันกรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ และ 0.62 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าบนพื้นผิวปรากฏเป็นรอยฟิล์มน้ำมันเกิดขึ้น 2 บริเวณอยู่ห่างจากกัน เมื่อระยะเวลาผ่านไปฟิล์มน้ำมันจะถูกเจ็ทพัดพาออกไปในแนวรัศมีจากจุดพุ่งชน ($X/D=0, Y/D=0$) สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (บริเวณสีดำที่ฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกจากพื้นผิว) และเมื่อระยะเวลาผ่านไปอีกสามารถสังเกตบริเวณของเจ็ทผนังที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปบางส่วน (บริเวณสีขาวสลับสีดำ) นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มน้ำมันสะสมเป็นเส้นสีขาวบางๆตัดผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งเกิดจากผลกระทบของสันแผ่นบิด และเมื่อระยะเวลาผ่านไป ตำแหน่งของฟิล์มน้ำมันที่เป็นเส้นสีขาวบางๆยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิมซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวแสดงถึงการไหลของเจ็ทหมุนควงหลังจากที่ชนพื้นผิว เจ็ทไหลออกตามแนวรัศมีทันที ไม่ได้เกิดการหมุนควงบนพื้นผิว ซึ่งประเด็นดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษา ลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5



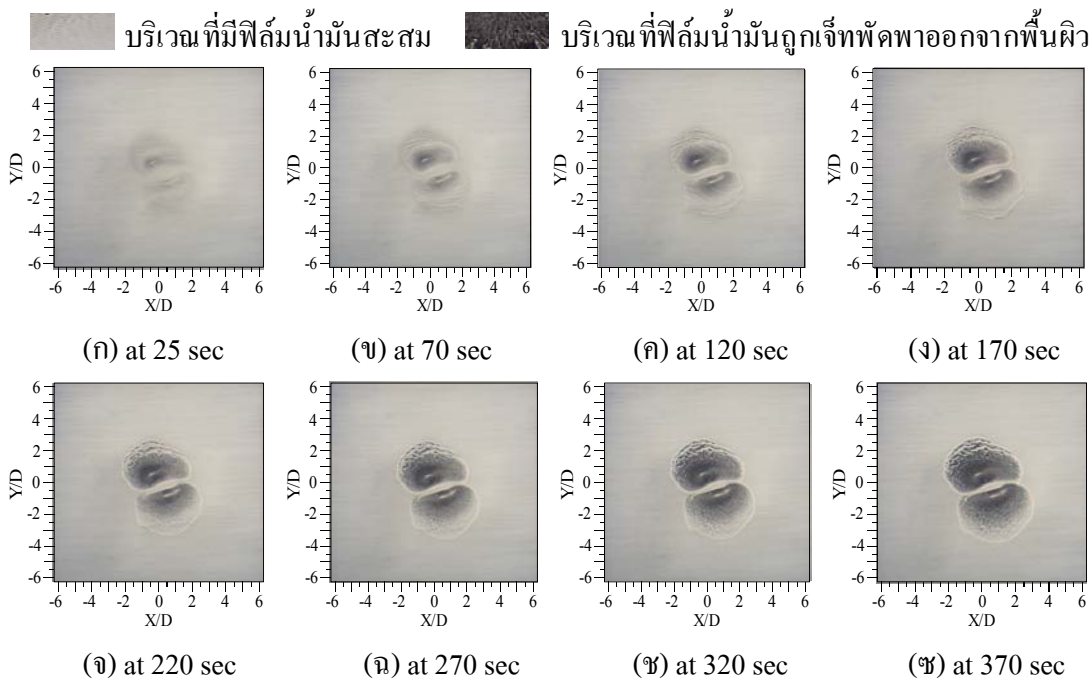
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)



รูปที่ 4.8 แสดงโครงสร้างการไหลบนพื้นผิวหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า



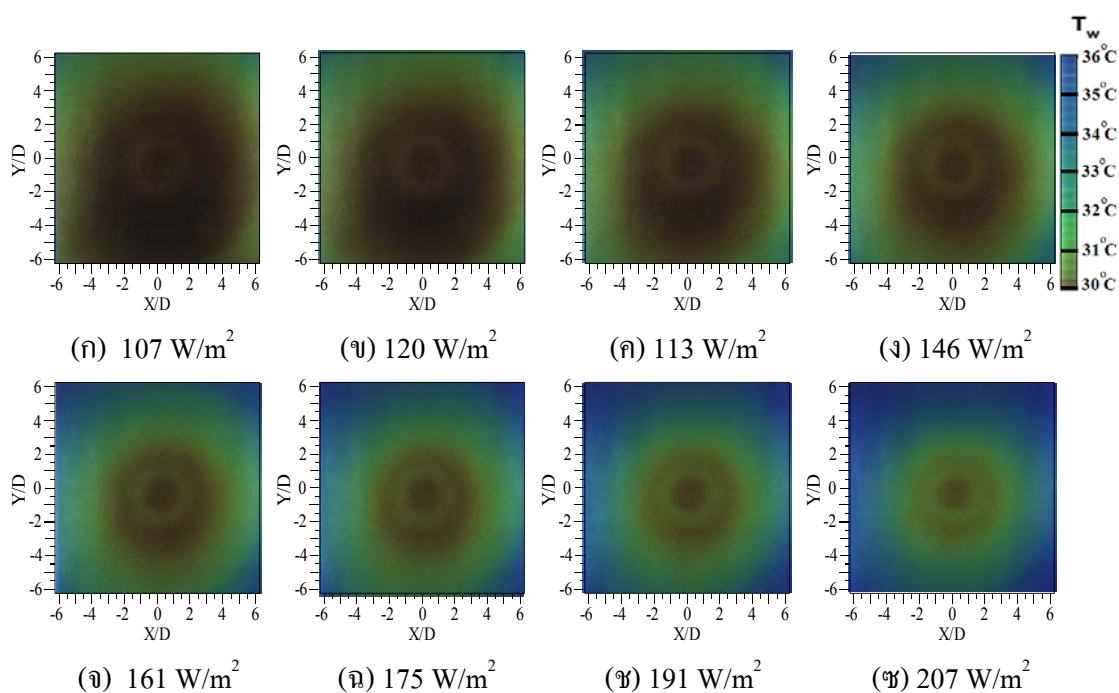
รูปที่ 4.9 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่างๆหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)



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

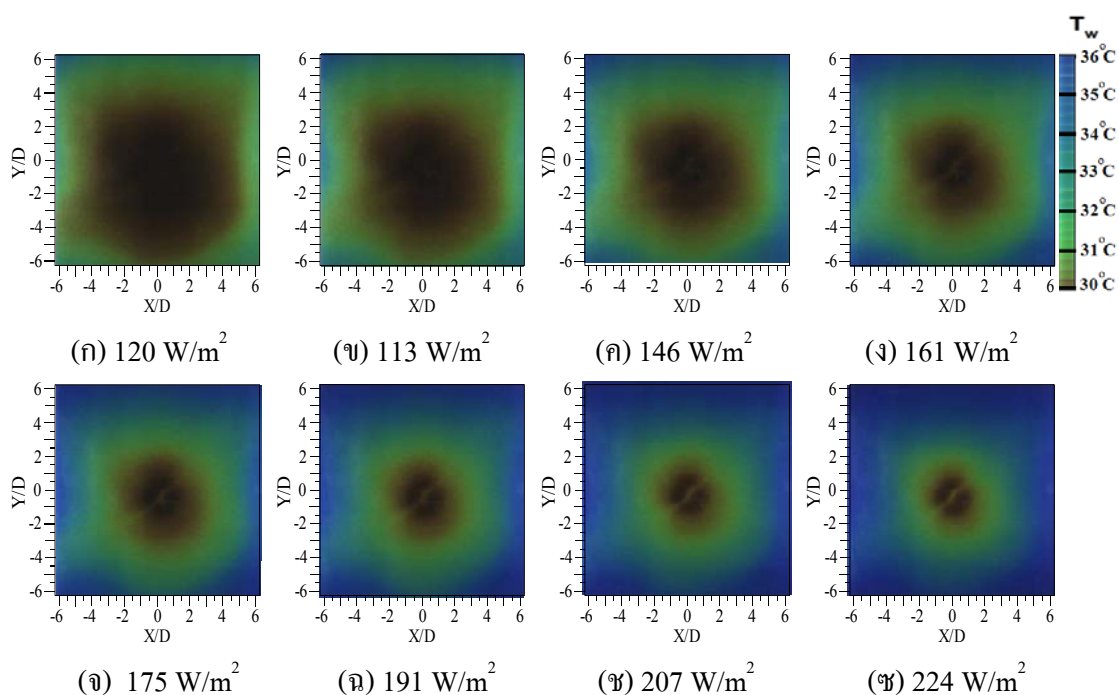
รูปที่ 4.11- 4.13 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่เปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำเดียวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ ในแต่ละรูปแสดงผลกรณีที่เปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เพื่อให้เห็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว กรณีที่ฟลักซ์ความต่ำแสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณที่สัมพันธ์กับการพาความร้อนต่ำ และที่ฟลักซ์ความร้อนสูงแสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณที่สัมพันธ์กับการพาความร้อนสูง

รูปที่ 4.11 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า สามารถสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนได้ชัดเจน จะเห็นปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak heat transfer) ที่เกิดขึ้นเป็นวงแหวนรอบจุดที่เจ็ทพุ่งชนดังแสดงในรูป 4.11 (จ) ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันรูปที่ 4.7 (ค) ที่บริเวณฟิล์มน้ำมันถูกพัดพาออกเป็นลักษณะวงแหวนรอบๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับกรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ และ 0.62 (รูปที่ 4.12 และ 4.13) เมื่อฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวสูง สามารถสังเกตผลกระทบจากสันของแผ่นบิตที่ทำให้เกิดบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำเป็นแนวยาวตัดผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแยกเป็นสองส่วน ซึ่งที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำไม่สามารถสังเกตผลกระทบจากสันของแผ่นบิตได้ แต่สามารถสังเกตลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอบๆ จุดที่เจ็ทพุ่งชนได้ สำหรับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแยกเป็นสองส่วนเกิดจากลักษณะการไหลของเจ็ทที่ออกจากปากทางออกของหัวฉีดแล้วชนพื้นผิวทันที ซึ่งผลการทดลองที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำที่ได้อธิบายมาแล้ว



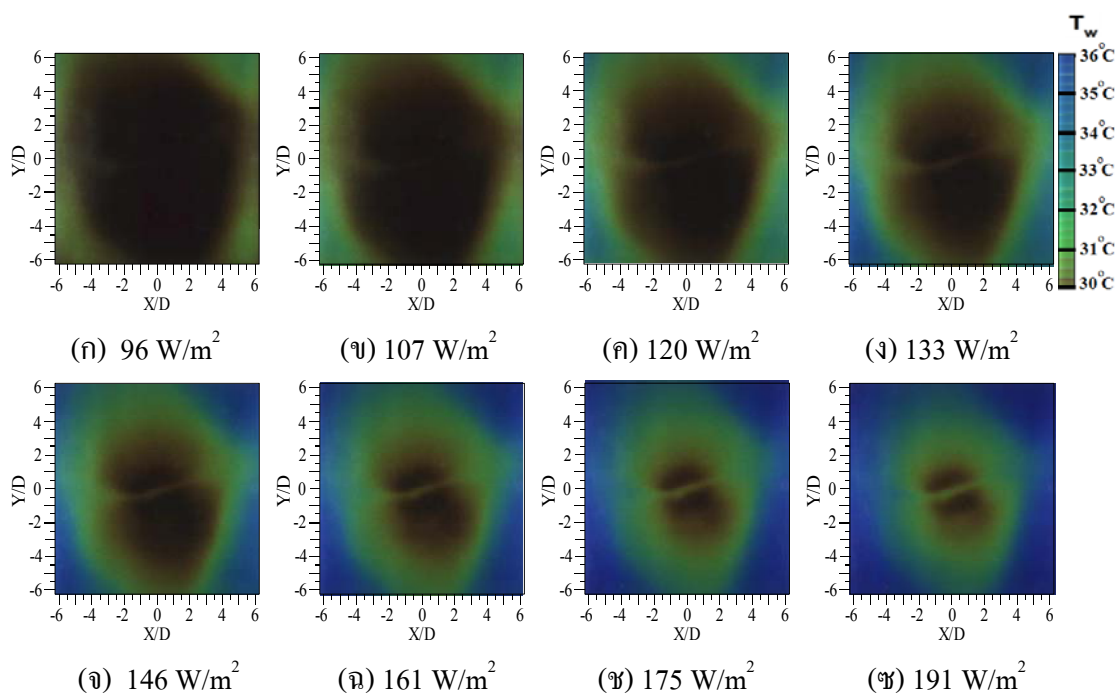
รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ

กรณีนี้จากท่อเปล่าที่ระยะ $L=2D$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)



รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีนี้ที่หมุนควง

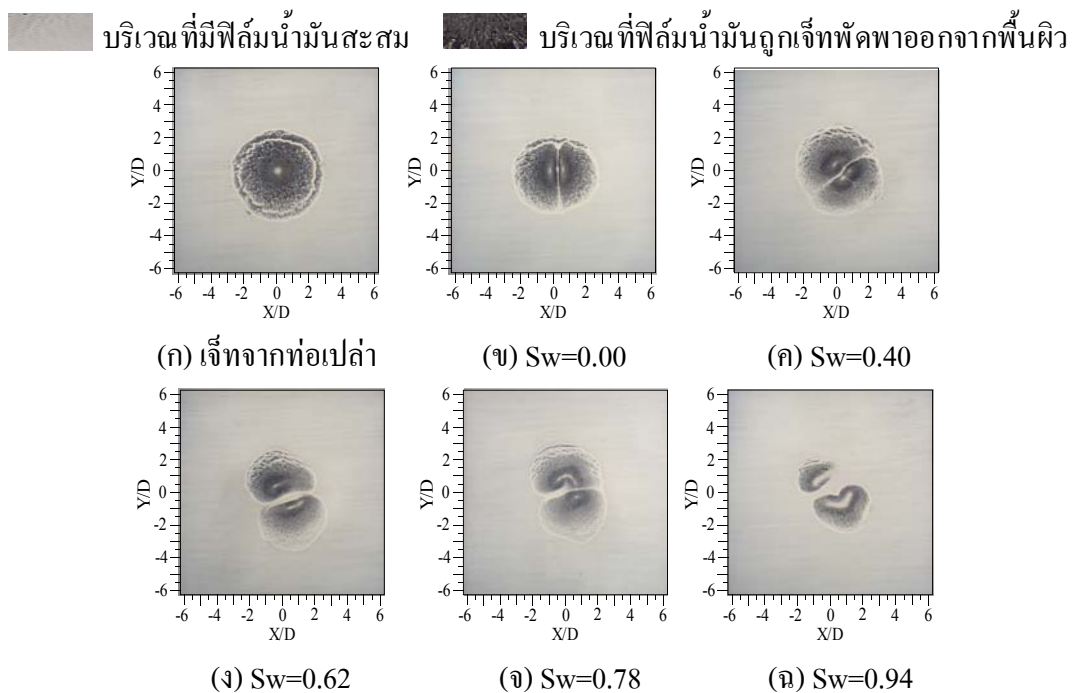
ที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะ $L=2D$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)



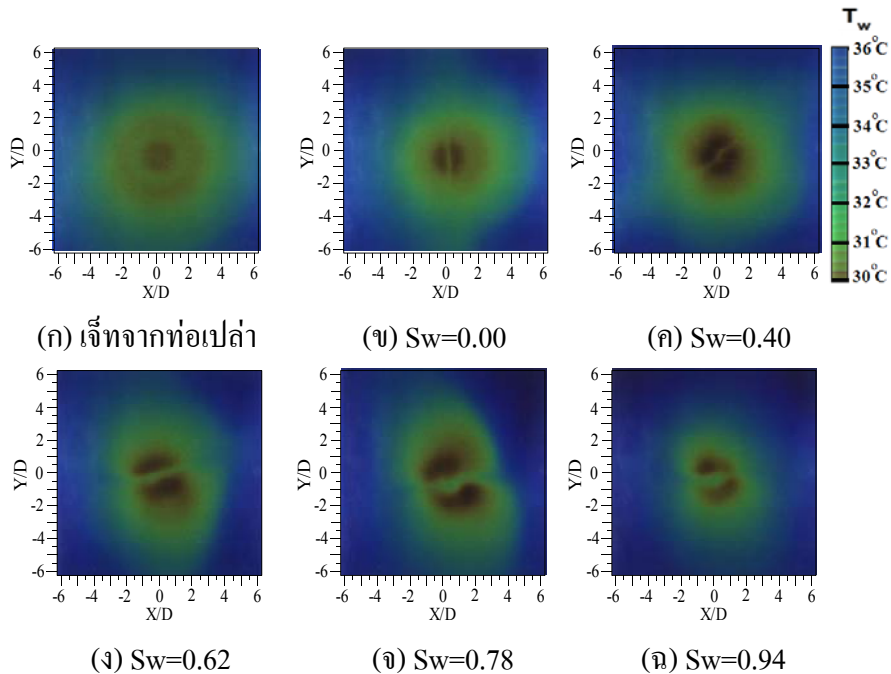
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนต่างๆ กรณีเจ็ทหมุนควง ที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ ที่ระยะ $L=2D$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)

4.1.5 ผลของสวิตช์ที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ

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



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



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

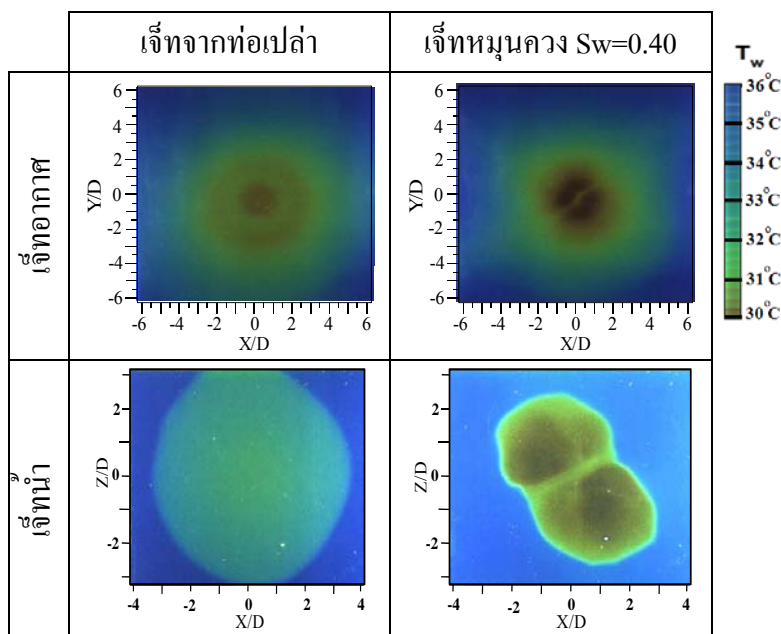
ผลการทดลองในกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า (เปรียบเทียบรูปที่ 4.14 (ก) และ 4.15 (ก)) ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นรูปร่างกลมสอดคล้องกับหน้าตัดของท่อเจ็ท จากรูปที่ 4.15 (ก) สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak heat transfer) เกิดขึ้น เป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่มีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในหัวข้อต่อไป) ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวในรูปที่ 4.14 (ก) สามารถสังเกตเห็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสมเป็นวงแหวนล้อมรอบบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน อย่างไรก็ตามบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสมเป็นวงแหวนจะเลื่อนตำแหน่งตามแนวรัศมี ขึ้นอยู่กับระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน (สังเกตจากรูปที่ 4.8)

ผลการทดลองในกรณีของท่อเจ็ทที่สอดแผ่นบีดทำให้เกิดผลกระทบจากสันของแผ่นบีดส่งผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแยกเป็นสองบริเวณ สำหรับผลการทดลองลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิว ปรากฏบริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ระหว่างสองบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว (บริเวณที่เป็นเส้นสีขาวตัดผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว จะปรากฏบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (บริเวณที่เป็นเส้นสีเขียวตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน) ในกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ บริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ระหว่างสองบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว (รูปที่ 4.14 (ข)) และบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (รูปที่ 4.15 (ข)) ลักษณะที่เกิดขึ้นสอดคล้องกัน คือตำแหน่งที่เกิดขึ้นตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและอยู่ในลักษณะขนานกับแนวแกน Y ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการวางตำแหน่งของการติดตั้งสันแผ่นบีด แต่ในกรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ พบว่าบริเวณที่มีฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ระหว่างสองบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว (รูปที่ 4.14 (ค)) และบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำอยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (รูปที่ 4.15 (ค)) ตำแหน่งที่เกิดขึ้นตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและอยู่ในลักษณะเอียงทำมุมกับแนวสันของแผ่นบีดประมาณ 45° และยังพบว่ามุมที่กระทำกับแนวสันของแผ่นบีดเพิ่มมากขึ้นเมื่อสเกลันิมเบอร์มากขึ้น จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวสอดคล้องกัน เมื่อสเกลันิมเบอร์เพิ่มขึ้นทำให้มุมที่เจ็ทไหลออกบริเวณปากทางออกของท่อเจ็ทกระทำกับแนวสันของแผ่นบีดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อตำแหน่งที่เจ็ทแต่ละด้านของแผ่นบีดพุ่งชนพื้นผิวเอียงทำมุมกับแนวสันของแผ่นบีดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำที่แสดงในรูปที่ 4.5

4.1.6 การเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีที่เป็นเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำ

รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีของเจ็ทอากาศที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่มีค่าเท่ากับ 207 W/m^2 , $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$ และกรณีของเจ็ทน้ำที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่มีค่าเท่ากับ 447 W/m^2 , $T_j=30^\circ\text{C}$, $Re=760$ สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์และฟลักซ์ความร้อนคงที่บนพื้นผิวของเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำมีความแตกต่างกัน แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีความสอดคล้องกัน

ในกรณีเจ็ทจากท่อเปล่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำมีลักษณะเป็นรูปวงกลม และบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แต่สำหรับการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำจะไม่เกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง เนื่องจากเป็นการไหลในช่วงที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ [19, 20] ในกรณีเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศและเจ็ทน้ำแยกเป็นสองบริเวณ บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่อยู่ระหว่างสองบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (บริเวณที่เป็นเส้นสีเขียวตัดผ่านศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน) ที่เกิดจากผลของสันแผ่นบิด พบว่ากรณีของเจ็ทน้ำและเจ็ทอากาศเกิดขึ้นในลักษณะเอียงทำมุมกับแนวสันแผ่นบิดในแนวเดียวกัน

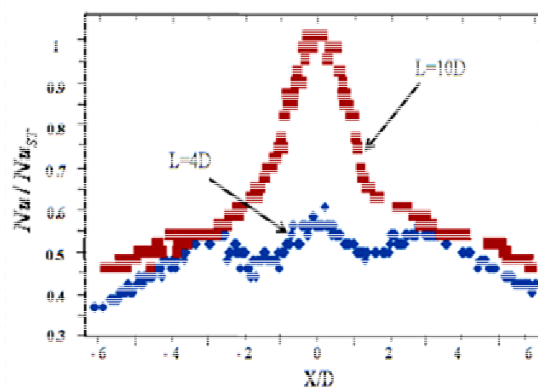
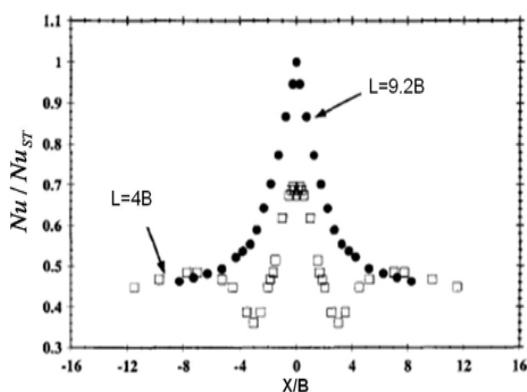


รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศ

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

4.2 การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศลำเดียวพุ่งชน

สำหรับหัวข้อต่อไปนี้จะอธิบายเกี่ยวกับอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทอากาศในกรณีของเจ็ทลำเดียว ในส่วนแรกจะเปรียบเทียบผลการศึกษการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจากงานวิจัยครั้งนี้เทียบกับผลการศึกษาที่ได้จากการทบทวนเอกสารงานวิจัย จากนั้นจะอธิบายถึงผลกระทบของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า และสุดท้ายจะอธิบายผลของสแควร์ลันนัมเบอร์ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ และ $10D$



(ก) ผลการทดลองของ Ashforth-Frost และคณะ [6]

(ข) ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้

(B คือความกว้างของสลีต)

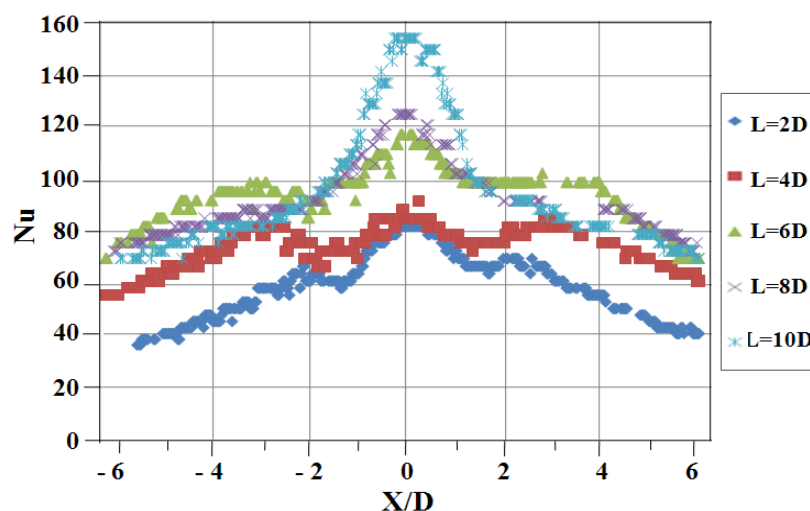
รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์จากการทดลองที่ได้จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยและผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ ($Re=20,000$ เท่ากันทั้งสองกรณี)

รูปที่ 1.17 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า รูปที่ 1.17 (ก) เป็นผลการทดลองของ Ashforth-Frost และคณะ [6] โดยใช้หัวฉีดที่เป็นแบบสลีต ในที่นี้ B คือความกว้างของสลีต สำหรับรูปที่ 1.17 (ข) เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งสองกรณี พบว่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวมีลักษณะคล้ายกัน คือกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ (รูปที่ 4.17 (ก) ที่เงื่อนไขระยะ $L=4B$ และ รูปที่ 4.17 (ข) ที่เงื่อนไขระยะ $L=4D$) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทั้งสองกรณีเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak heat transfer) แต่ตำแหน่งที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีแตกต่างกัน อาจจะเป็นสาเหตุมาจากลักษณะหัวฉีด

ที่เป็นแบบสล็อตและแบบท่อกลม ซึ่งลักษณะการไหลที่ปากทางออกของท่อเจ็ทมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สำหรับในกรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง (รูปที่ 4.17 (ก) ที่เงื่อนไขระยะ $L=9.2B$ และรูปที่ 4.17 (ข) ที่เงื่อนไขระยะ $L=10D$) กรณีดังกล่าวระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่นัสเซิลด์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวมีลักษณะเหมือนกัน คือนัสเซิลด์นัมเบอร์สูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และจะค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ท

4.2.1 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า

รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า สำหรับเส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงผลของตัวแปรระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ โดยภาพรวมของผลการทดลองในทุกๆ กรณีตัวแปรระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนแล้วค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมี



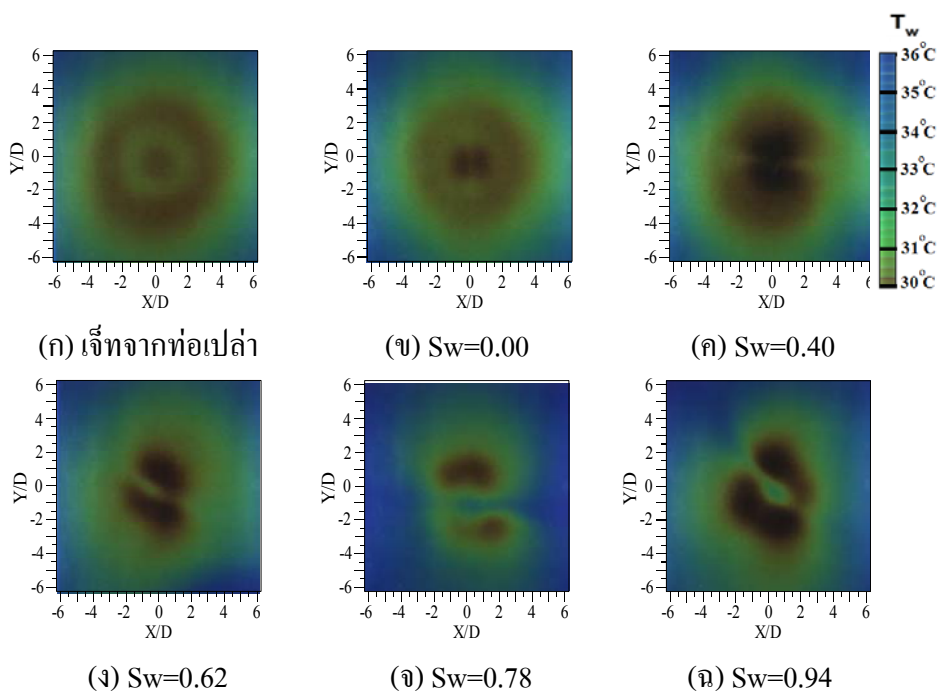
รูปที่ 4.18 แสดงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ($Re=20,000$)

กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวค่อนข้างต่ำกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ เนื่องจากเป็นระยะที่เจ็ทไหลออกจากท่อพุ่งชนพื้นผิวทันที และเป็นช่วงการไหลของเจ็ทที่มีการขยายหน้าตัดได้น้อย สอดคล้องกับผลการทดลองการแพร่กระจายของเจ็ทอิสระรูปที่ 4.1 สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุด

ศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ($X/D=0$) และค่อยๆลดลงตามแนวแกน X จากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งที่พิกัด $X/D=\pm 2$ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak heat transfer) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ashforth-Frost และ คณะ [6] ซึ่งได้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการไหลบนพื้นผิวโดยที่บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเป็นการไหลแบบราบเรียบ หลังจากเจ็ทไหลตามพื้นผิวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลเป็นแบบปั่นป่วนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

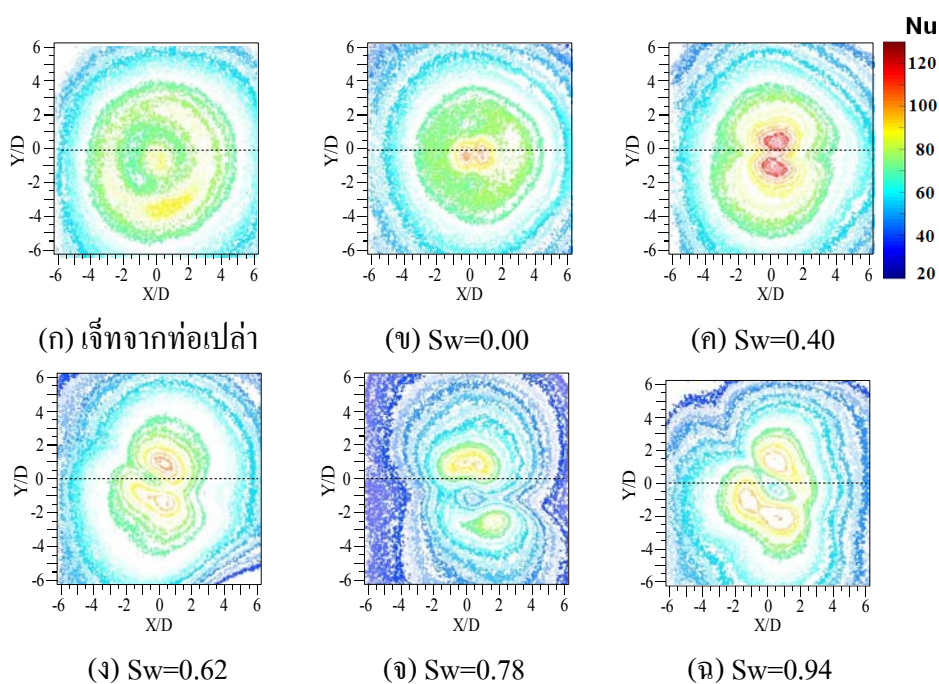
กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ระยะ $L=2D$ แต่ก็ยังคงเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง โดยเลื่อนตำแหน่งที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงพิกัด $X/D=\pm 3$ ห่างออกจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ($X/D=0$) มากขึ้นเมื่อเทียบกับที่ระยะ $L=2D$ ส่วนกรณีที่ระยะ $L=6D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีที่ระยะ $L=4D$ และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอมากที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ 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 $L=6D-8D$ จะเกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับสาเหตุที่มีความแตกต่างมาจากสภาพและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เช่น รูปทรงหัวฉีด การจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิว ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ เป็นต้น [16, 19, 20]

4.2.2 ผลของสวิตช์ล้นน้ำเบอร์ที่มีต่อการกระจายของน้ำเซลดันน้ำเบอร์บนพื้นผิวกรณีของ เจ็ทลำเดี่ยว

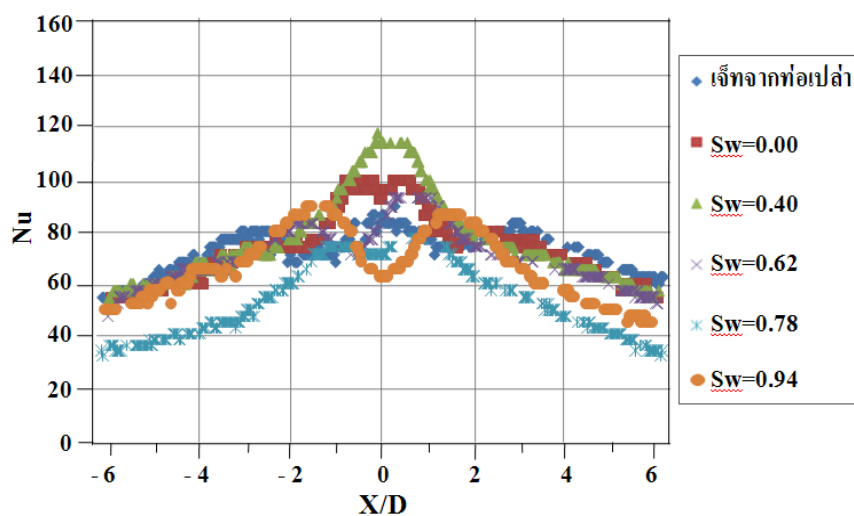


รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะ $L=4D$

($\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)



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



รูปที่ 4.21 แสดงผลของสเวิร์ลน์มเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $L=4D$ ($Re=20,000$)

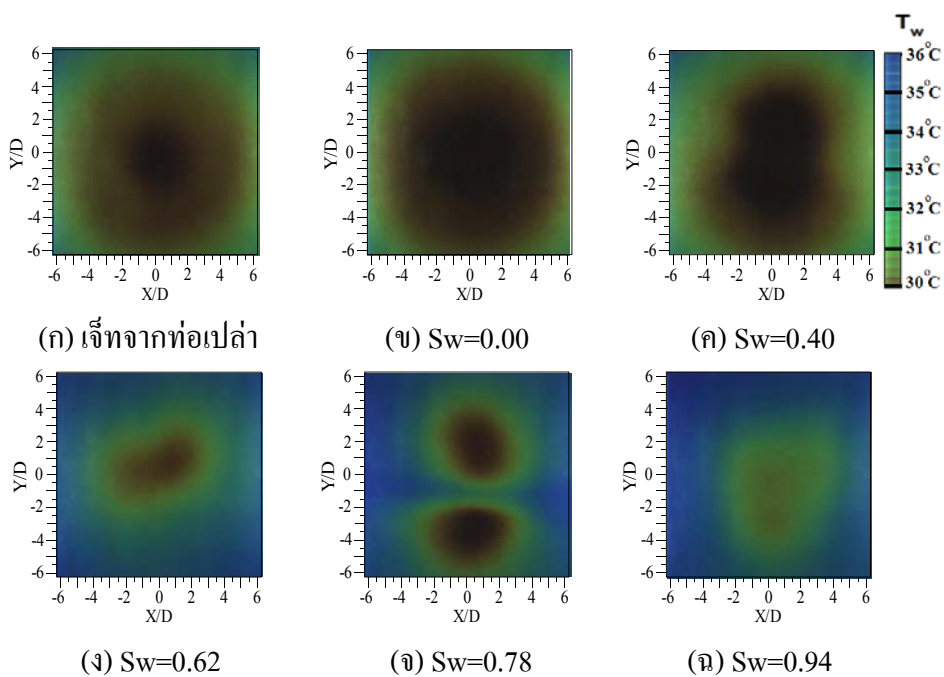
รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 207 W/m^2 และรูปที่ 4.20 แสดงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ จากรูปสามารถเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของแต่ละกรณีสเวิร์ลน์มเบอร์ เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนพบว่ากรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ และ 0.40 (รูปที่ 20 (ข) และ (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนเหมือนกับอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทจากท่อเปล่า เมื่อเพิ่มสเวิร์ลน์มเบอร์มากขึ้น ($Sw=0.62, 0.78$ และ 0.94) พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทจากท่อเปล่า ในกรณีที่พิจารณาบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของเจ็ทจากท่อเปล่าเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ส่วนเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40, 0.62, 0.78$ และ 0.94 อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะแยกออกเป็นสองบริเวณและเกิดขึ้นใกล้กับจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และระยะห่างระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดทั้งสองบริเวณเพิ่มมากขึ้นเมื่อสเวิร์ลน์มเบอร์เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองจะสอดคล้องกับกรณีที่ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (ตามแนวแกน $Y/D=0$ ของรูป 4.20) ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ สำหรับกราฟแต่ละเส้นแสดงนัสเซิลด์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่เงื่อนไขสเวิร์ลน์มเบอร์ต่างๆ จากรูปพบว่าเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเท

ความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ โดยบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงอยู่ในช่วงที่แคบ (ระหว่าง $X/D=-0.5$ ถึง $X/D=0.5$) เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขเดียวกันรูปที่ 4.20 (ค) พื้นที่ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (บริเวณที่เป็นสีแดง) มีบริเวณกว้างกว่าที่แสดงในรูปที่ 4.21 เนื่องจากตำแหน่งที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบนพื้นผิวของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ไม่ได้เกิดขึ้นที่บริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แต่จะเกิดขึ้นห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งในรูปที่ 4.21 เป็นนัสเซิลด์นัมเบอร์ที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน จึงทำให้เส้นกราฟที่แสดงพื้นที่ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีบริเวณแคบ

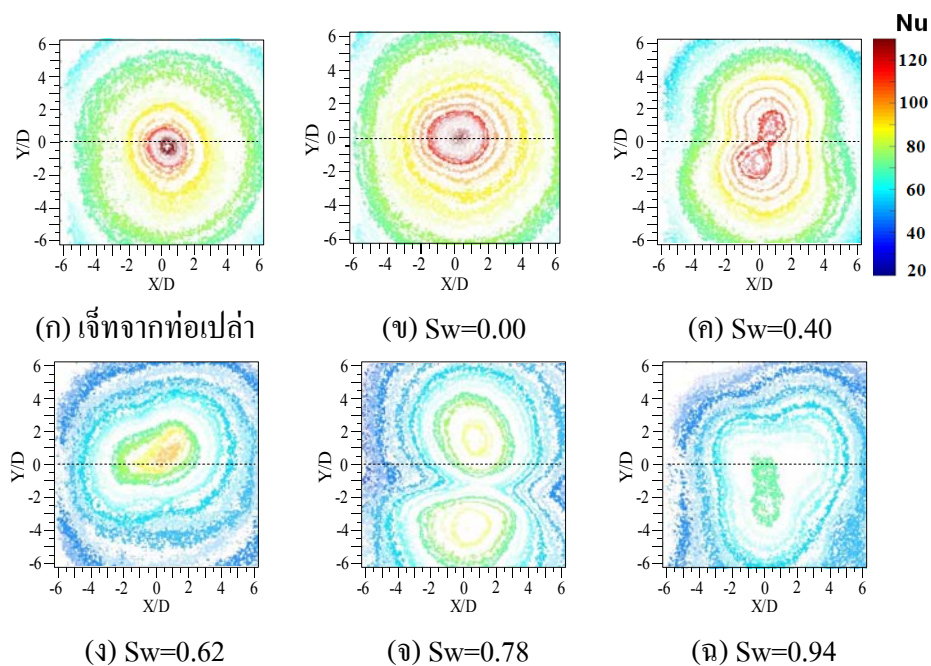
รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 207 W/m^2 และรูปที่ 4.23 แสดงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=10D$ จากรูปสามารถเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของแต่ละกรณีที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ ในกรณีที่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอบๆ ที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ และ 0.40 บริเวณรอบๆ ที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มมากขึ้น ($Sw=0.62, 0.78$ และ 0.94) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณรอบๆ ที่เจ็ทพุ่งชนต่ำลง กรณีที่พิจารณาบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและมีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ (รูปที่ 4.23 (ค)) บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและมีลักษณะเหมือนวงกลมสองวงสัมผัสกัน เมื่อสเวิร์ลนัมเบอร์เพิ่มมากขึ้น ($Sw=0.62, 0.78$ และ 0.94) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนต่ำลง โดยเฉพาะที่เงื่อนไข $Sw=0.94$ (รูปที่ 4.23 (ง)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำสุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ สาเหตุที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำเกิดจากที่เงื่อนไขดังกล่าว สเวิร์ลนัมเบอร์มีค่ามากทำให้การหมุนควงของเจ็ทเกิดขึ้นสูง ส่งผลต่อความเร็วในแนวแกนของเจ็ทลดลง ประกอบกับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง ทำให้โมเมนตัมที่พุ่งชนพื้นผิวลดลงซึ่งจะสอดคล้องกับกรณีที่ได้มีศึกษา ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทน้ำ (ดูผลการทดลองในรูปที่ 4.6 ประกอบ)

รูปที่ 4.24 แสดงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (ตามแนวแกน $Y/D=0$ ของรูป 4.23) ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=10D$ สำหรับกราฟแต่ละเส้นแสดงนัสเซิลด์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ ในกรณีเจ็ทจากท่อเปล่าบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด แต่บริเวณรอบๆ ที่เจ็ทพุ่งชนของกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสเวิร์ลนัมเบอร์อื่นๆ

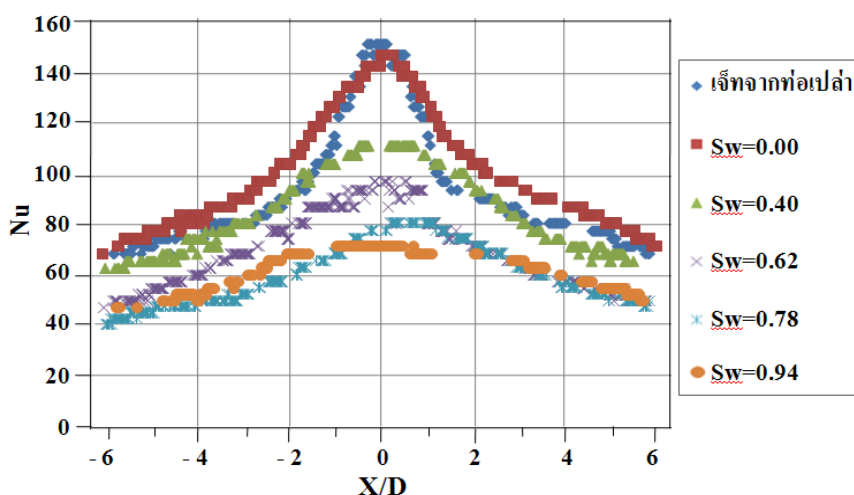


รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะ $L=10D$

($\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$, $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)



รูปที่ 4.23 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะ $L=10D$ ($Re=20,000$)

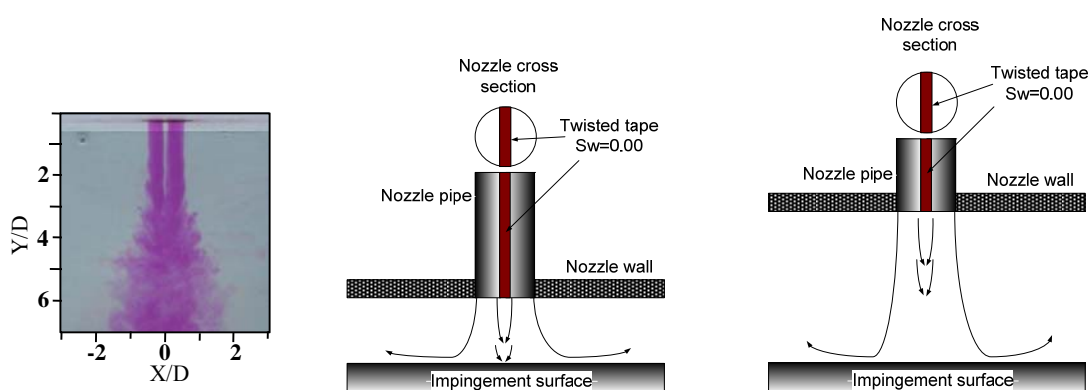


รูปที่ 4.24 แสดงผลของสวิตซ์ล้น้มเบอร์ที่มีต่อการกระจายของนัสเซลต์ล้น้มเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $L=10D$ ($Re=20,000$)

สำหรับสันของแผ่นบีดมีผลต่อการไหลของเจ็ทที่ปากทางออก ทำให้มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน รูปที่ 4.20 (ข) แสดงการกระจายของนัสเซลต์ล้น้มเบอร์บนพื้นผิวกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ ($L=4D$) บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงแยกออกเป็นสองจุด เกิดจากเจ็ทที่ไหลออกจากท่อแต่ละด้านของแผ่นบีดพุ่งชนพื้นผิวทันที ทำให้ส่วนแกนกลางของเจ็ทในแต่ละด้านของแผ่นบีดเกิดการผสมกันน้อย (ดูรูปที่ 4.25 (ข) ประกอบ) แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง ($L=10D$ รูปที่ 4.23 (ข)) บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีแค่เพียงแค่จุดเดียว เกิดจากส่วนแกนกลางของเจ็ทเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ททั้งสองด้านของแผ่นบีดอย่างสมบูรณ์ (ดูรูปที่ 4.25 (ค) ประกอบ) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำอิสระตามที่แสดงในรูปที่ 4.25 (ก) ผลจากของสันแผ่นบีดทำให้ในส่วนแกนกลางของเจ็ทในช่วง $Y/D=0-2$ ไม่มีสีเนื่องจากไม่มีการผสมกันระหว่างเจ็ทแต่ละด้านของแผ่นบีด สำหรับในช่วง $Y/D=2-3$ ในส่วนแกนกลางของเจ็ทเกิดการผสมกันเล็กน้อย และในช่วง $Y/D \geq 4$ ในส่วนแกนกลางของเจ็ทเกิดการผสมอย่างสมบูรณ์

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

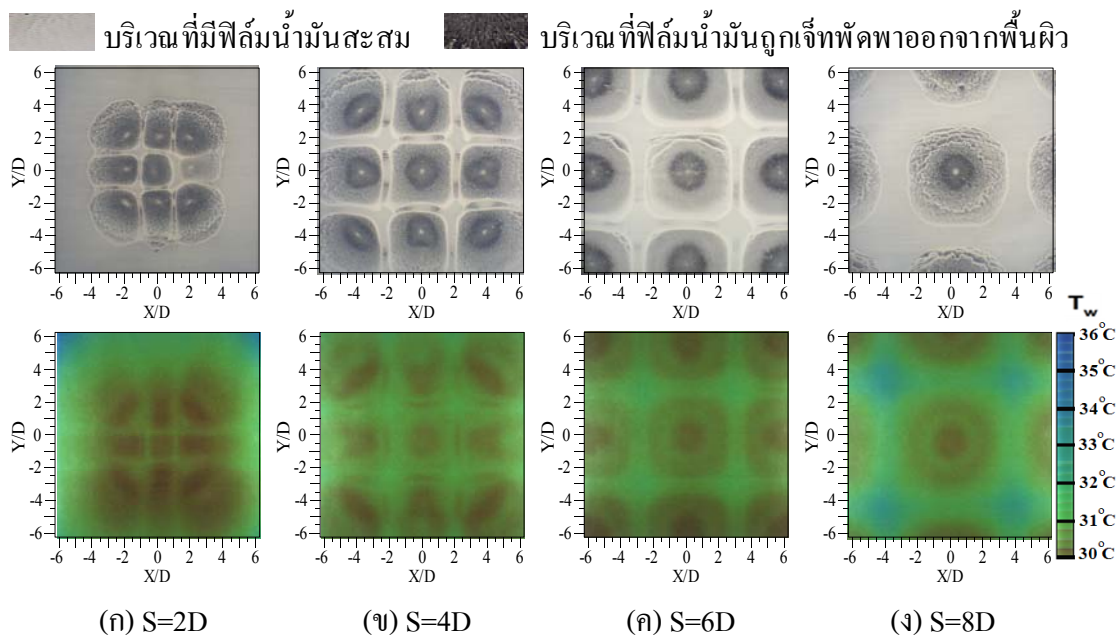
สำหรับกรณีเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ บริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า นั้น ไม่ได้เกิดจากการไหลหมุนควงของเจ็ท เพราะที่เงื่อนไขดังกล่าวได้สอดคล้องกับแบบตรงในท่อเจ็ท แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นเกิดจากความเร็วกว่าที่ปากทางออกของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ สูงกว่าความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ทจากท่อเปล่า เนื่องจากการทดลองทั้งหมดกำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทคงที่ พื้นที่หน้าตัดท่อเจ็ท $Sw=0.00$ น้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดท่อเปล่า ทำให้ความเร็วที่ปากทางออกเพิ่มขึ้น



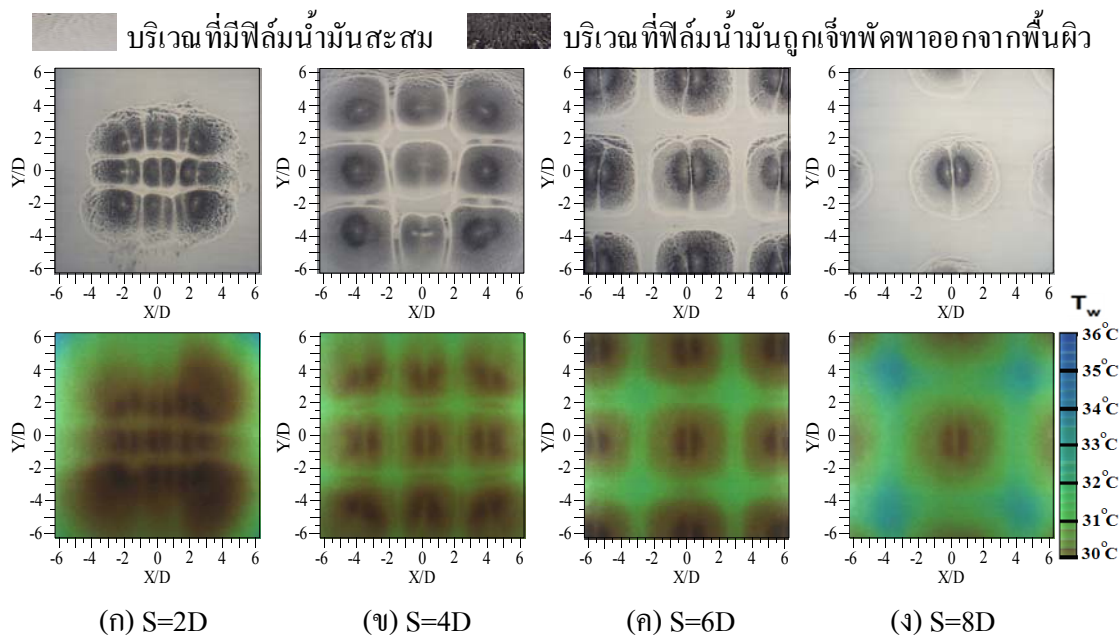
(ก) เจ็ทน้ำอิสระ (ข) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ระยะ L ต่ำ (ค) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ระยะ L สูง รูปที่ 4.25 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทที่เกิดการผสมกันในส่วนแกนกลางของเจ็ทที่เกิดจากผลของสันแผ่นบิดกรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.00$

4.3 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน

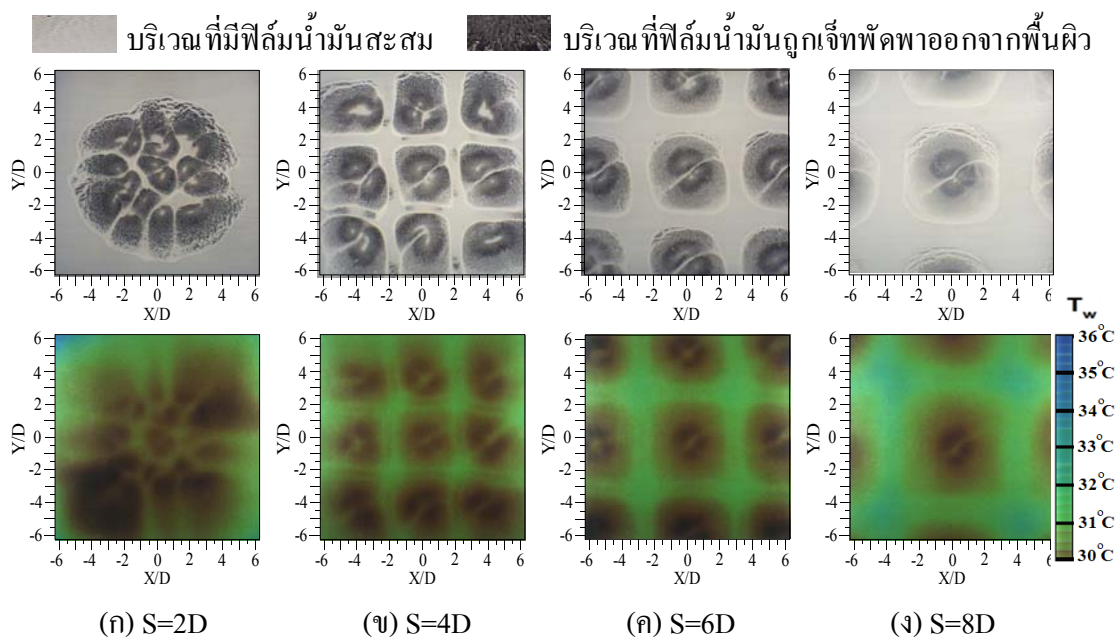
รูปที่ 4.26-4.29 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน จากภาพรวมผลการเปรียบเทียบลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีความสอดคล้องกัน คือจากผลการทดลองลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวบริเวณของฟิล์มน้ำมันที่ถูกเจ็ทพัดพาออกมา (บริเวณสีดำ) เมื่อเทียบกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ส่วนบริเวณของฟิล์มน้ำมันที่ถูกเจ็ทพัดพาน้อยหรือบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสมอยู่ (บริเวณสีขาวหรือบริเวณสีขาวสลับสีดำ) เมื่อเทียบกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวเป็นบริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำและต่ำมาก (บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงบนพื้นผิว)



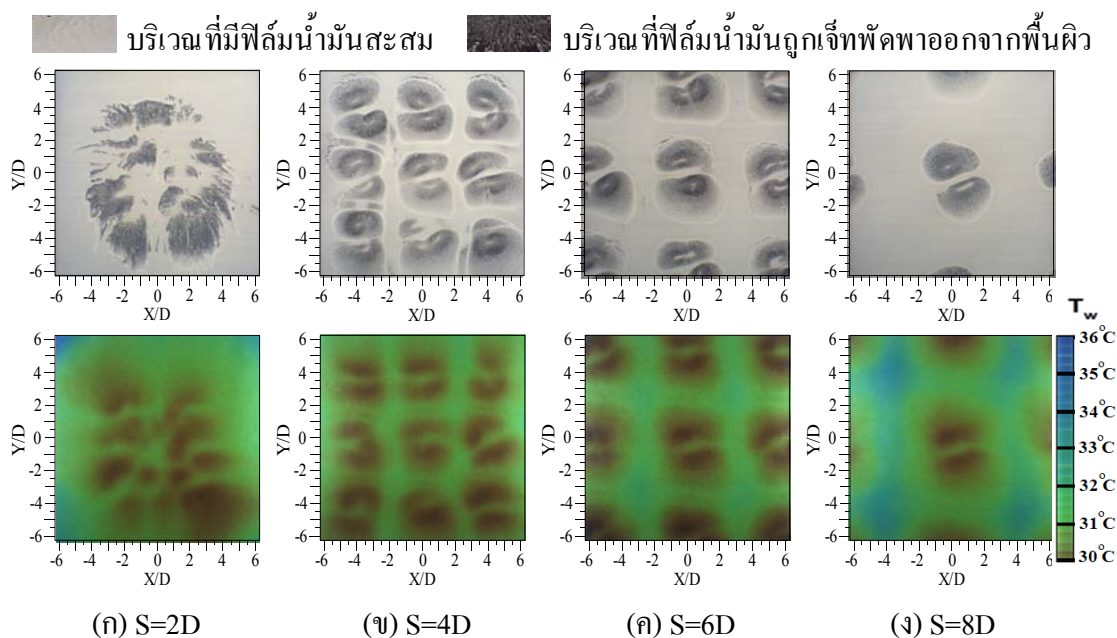
รูปที่ 4.26 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\text{Re}=20,000$)



รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\text{Re}=20,000$)



รูปที่ 4.28 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)

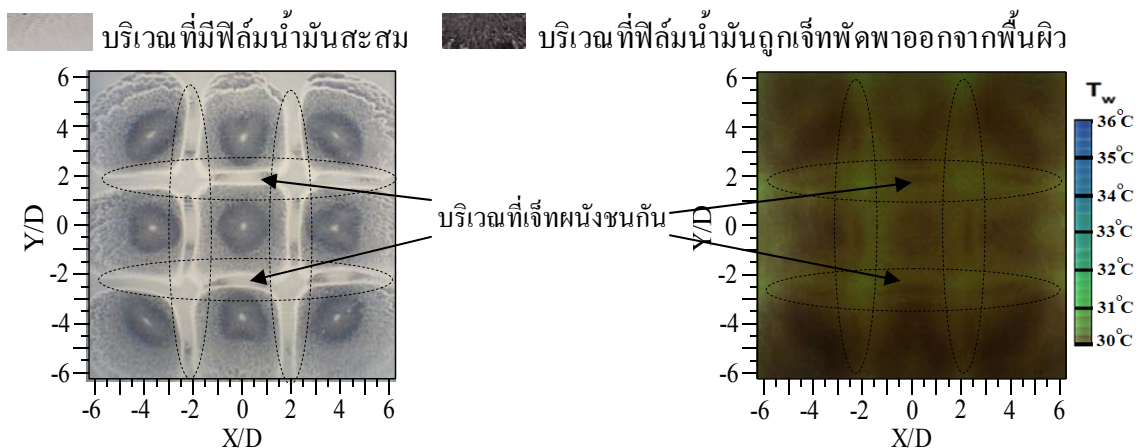


รูปที่ 4.29 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิว (แถวบน) ที่ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ ระยะ $L=2D$, $\dot{q}=207 \text{ W/m}^2$ ($T_j=28.5^\circ\text{C}$, $Re=20,000$)

รูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ตามลำดับ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ และ $4D$ (รูปที่ 4.26 (ก), (ข) และ 4.27 (ก), (ข)) อิทธิพลจากการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางมีผลทำให้การไหลพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางมีบริเวณแคบและมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางมีบริเวณแคบและมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสสอดคล้องกัน ส่วนกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$ และ $8D$ (รูปที่ 4.26 (ค), (ง) และ 4.27 (ค), (ง)) พบว่าการไหลของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบมีอิทธิพลต่อการจำกัดบริเวณการไหลพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางน้อยลง ทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ตรงกลางมีบริเวณกว้างและมีลักษณะเกือบเป็นรูปวงกลมเหมือนกับลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว (รูป 4.14 (ก) และ 4.15 (ก))

รูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ และ 0.62 ตามลำดับ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย $S=2D$ (รูปที่ 4.28 (ก) และ 4.29 (ก)) พบว่าลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กัน ส่งผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่เป็นระเบียบเช่นกัน แต่กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมากขึ้น ($S=4D, 6D$ และ $8D$) เจ็ทที่อยู่ใกล้กันเกิดการผสมกันน้อยลง ทำให้ลักษณะการไหลบนพื้นผิวมีระเบียบมากขึ้น สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิว ส่งผลทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีระเบียบตามไปด้วย

สำหรับการไหลบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทจะเกิดปรากฏการณ์การชนกันระหว่างเจ็ทผนังของเจ็ทแต่ละลำบนพื้นผิว โดยเฉพาะกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำและระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ สามารถสังเกตผลกระทบจากการชนกันระหว่างเจ็ทผนังที่อยู่ใกล้กัน โดยลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวจากรูปที่ 4.30 (ก) พบว่าบริเวณระหว่างที่เจ็ทพุ่งชนจะเห็นฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออก ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของรูปที่ 4.30 (ข) ในบริเวณระหว่างที่เจ็ทพุ่งชนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเล็กน้อย



(ก) ลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมัน

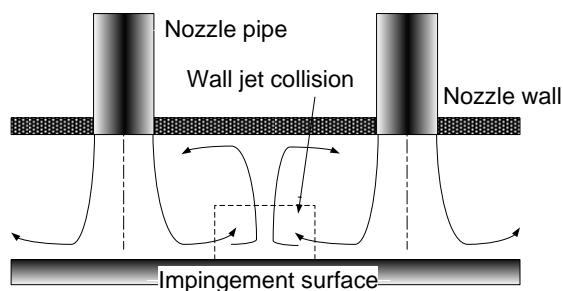
(ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec)

(ข) ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

($\dot{q}=120 \text{ W/m}^2$)

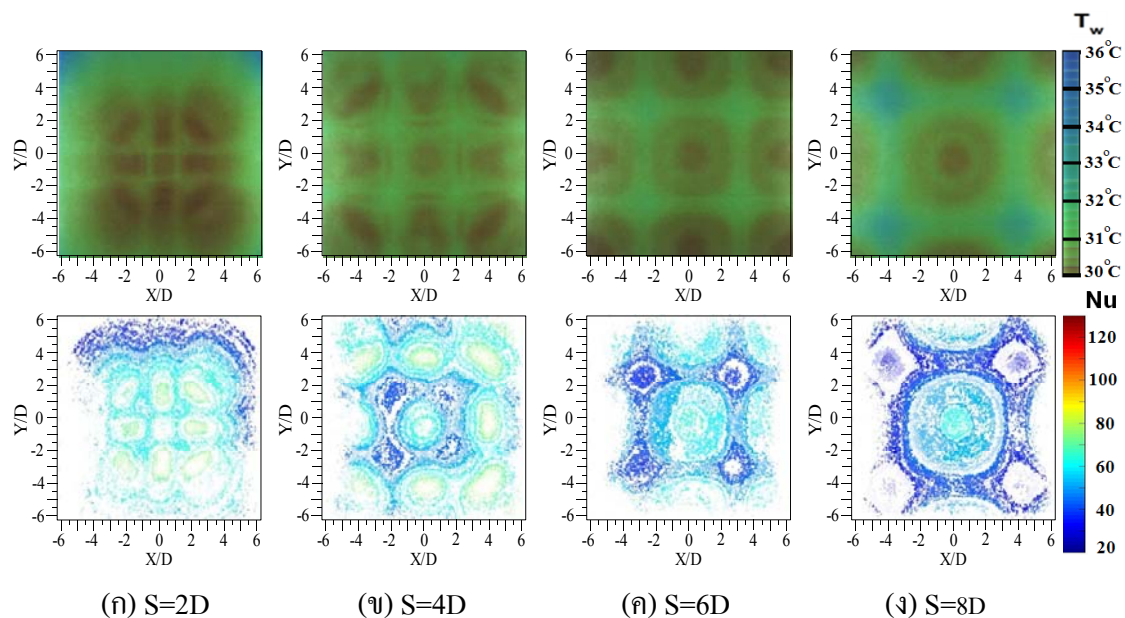
รูปที่ 4.30 ผลจากการชนกันของเจ็ทผนังทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ที่เงื่อนไขระยะ $L=2D$ และระยะ $S=4D$ ($Re=20,000$)

อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนังจะมีผลอย่างมากเฉพาะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนค่า $L=2D$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย $S=2D$ และ $4D$ เนื่องจากเป็นช่วงที่ทำให้การไหลบนพื้นผิวมีความเร็วสูงส่งผลต่อการไหลของเจ็ทผนังแต่ละลำที่อยู่ใกล้กันเกิดการชนกันอย่างรุนแรง (ดูรูปที่ 4.31 ประกอบ) แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D, 6D, 8D$ และ $10D$ ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$ และ $8D$ การไหลบนพื้นผิวมีความเร็วต่ำกว่าที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ และ $4D$ ทำให้ความรุนแรงของเจ็ทผนังแต่ละลำที่อยู่ใกล้กันเกิดการชนกันน้อยลง ทำให้ผลกระทบจากการชนกันของเจ็ทผนังที่มีต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่ปรากฏขึ้น [21]

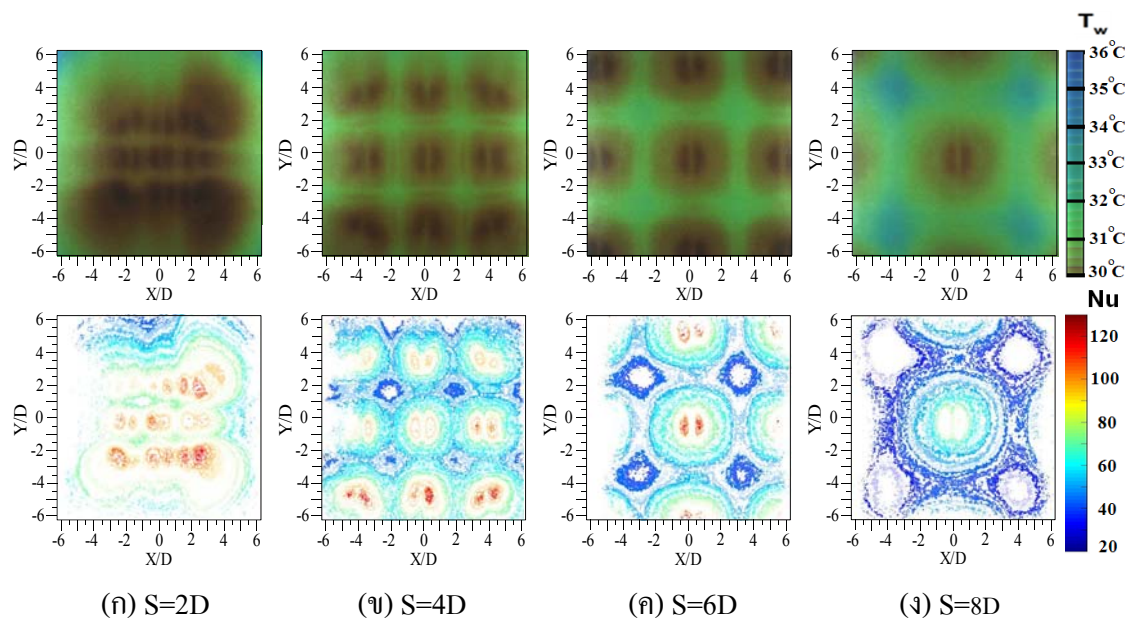


รูปที่ 4.31 แสดงปรากฏการณ์การชนกันของเจ็ทผนัง

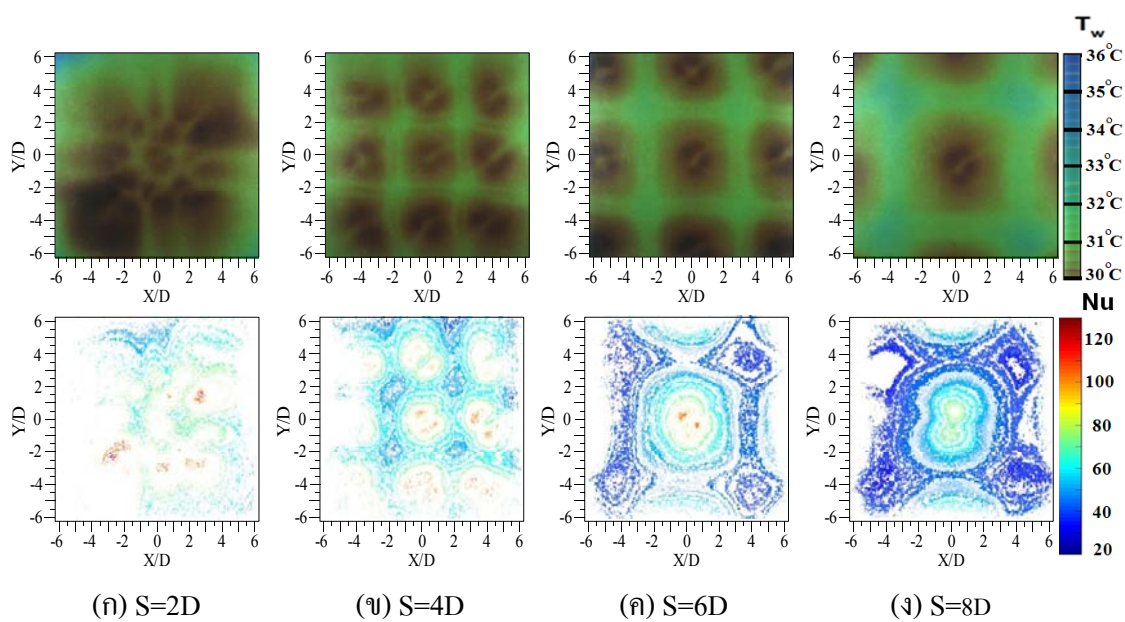
4.4 ผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ที่มีต่อการกระจายของน้ำเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิววงรีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน



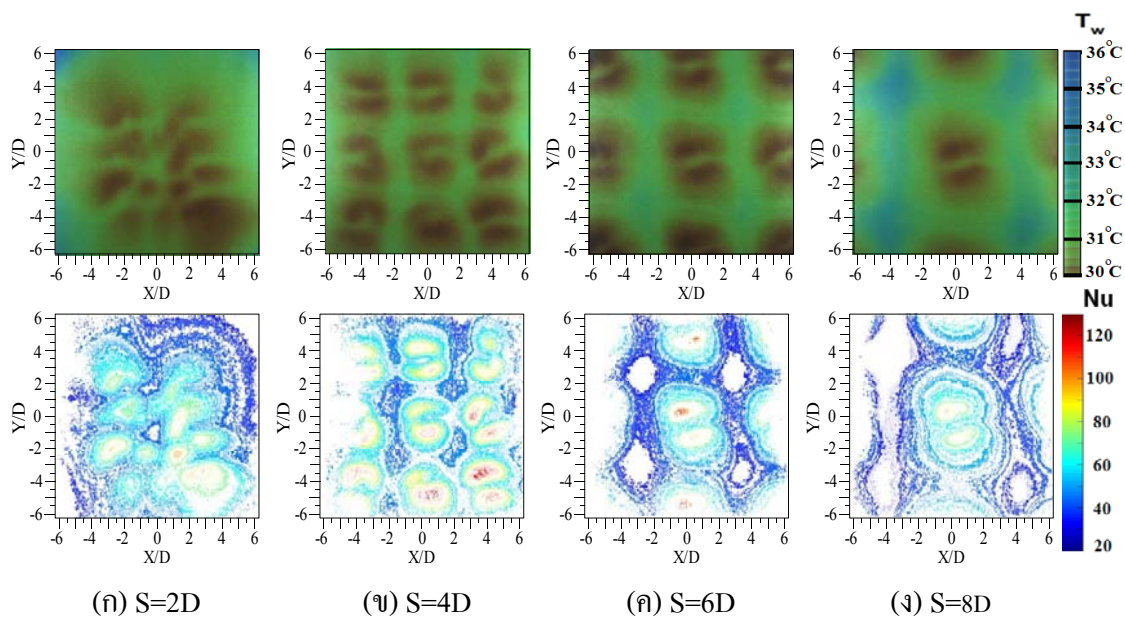
รูปที่ 4.32 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)



รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของน้ำเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)



รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)



รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แถวบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ ระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)

รูปที่ 4.32-4.35 แสดงผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของ เจ็ท โดยพิจารณาผลกระทบของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว สำหรับภาพรวมของผลการทดลองกรณีระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย $S=2D$ และ $4D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมาก $S=6D$ และ $8D$

รูปที่ 4.32 และ 4.33 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของน้ำสเฟลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ กรณีเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนพบว่าที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ (รูปที่ 4.32 (ก) และ 4.33 (ก)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทอื่นๆ และเมื่อระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมากขึ้น พบว่าบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำลง โดยเฉพาะที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=8D$ (รูปที่ 4.32 (ง) และ 4.33 (ง)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำสุดเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทอื่นๆ ในกรณีที่พิจารณาบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ บริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ซึ่งจะแตกต่างกับที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D, 6D$ และ $8D$ บริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีพื้นที่กว้างขึ้น

รูปที่ 4.34 และ 4.35 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของน้ำสเฟลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ กรณีของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ และ 0.62 ตามลำดับ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ (รูปที่ 4.34 (ก) และ 4.35 (ก)) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวก่อนข้างซับซ้อน ไม่สามารถระบุบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนได้ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ (รูปที่ 4.34 (ข) และ 4.35 (ข)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขอื่นๆ และที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$ และ $8D$ พบว่าบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำลง ในกรณีที่พิจารณาบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีพื้นที่กว้างขึ้น

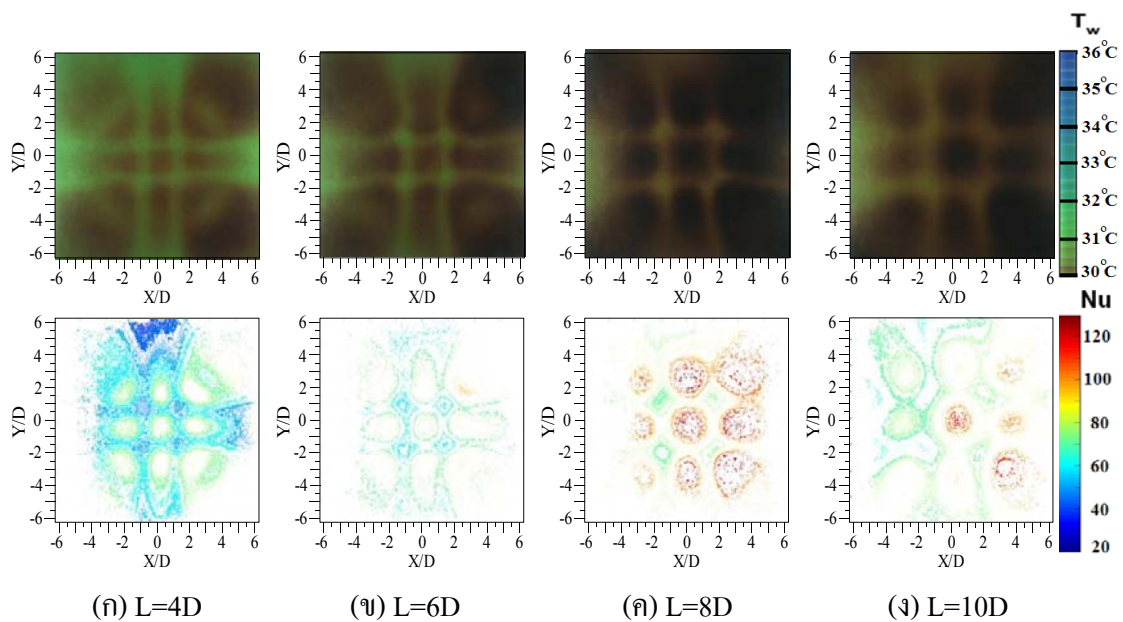
ในกรณีที่เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวทั้งหมดของรูปที่ 4.32-4.35 ที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเดียวกัน พบว่าเจ็ทหมุนควงให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและสม่ำเสมอกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่าเฉพาะบางเงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเท่านั้น ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ (เปรียบเทียบรูปที่ 4.32-4.35 ทั้งหมดของรูป (ก)) พบว่าเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ (รูปที่ 4.33 (ก)) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่เงื่อนไขสเฟลด์นัมเบอร์อื่นๆ ทั้งบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่ง

ชน สำหรับเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ (รูปที่ 4.35 (ก)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ (เปรียบเทียบรูปที่ 4.32-4.35 ทั้งหมดของรูป (ข)) พบว่าเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.00$ (รูปที่ 4.33 (ข)) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่เงื่อนไขสวิตช์ล้นนัมเบอร์อื่นๆ เฉพาะบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน แต่สำหรับเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ (รูปที่ 4.34 (ข)) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสวิตช์ล้นนัมเบอร์อื่นๆ

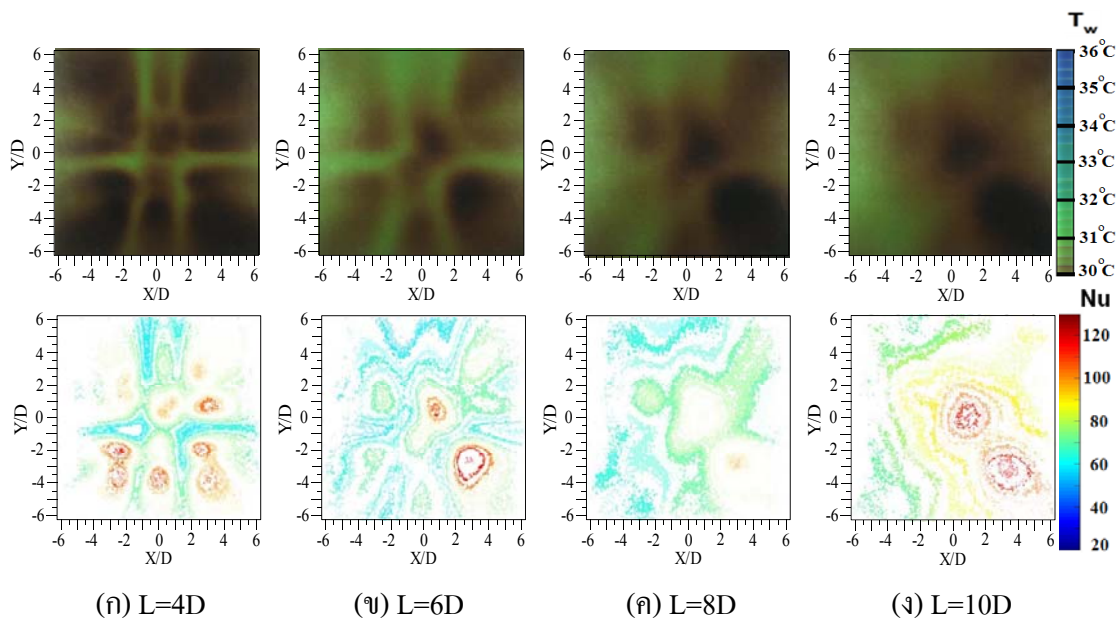
สำหรับกรณีที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$ และ $8D$ (เปรียบเทียบรูป 4.32-4.35 (ค) และ (ง) ทั้งหมด) เมื่อพิจารณาบริเวณจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อที่ใส่แผ่นบิดมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า โดยเฉพาะเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ (รูปที่ 4.34 (ก) และ (ข)) บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่เงื่อนไขสวิตช์ล้นนัมเบอร์อื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าเจ็ทจากท่อที่ใส่แผ่นบิดมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า โดยเฉพาะที่เงื่อนไข $Sw=0.62$ (รูปที่ 4.35 (ค) และ (ง)) บริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าที่เงื่อนไขสวิตช์ล้นนัมเบอร์อื่นๆ

4.5 ผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีผลต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน

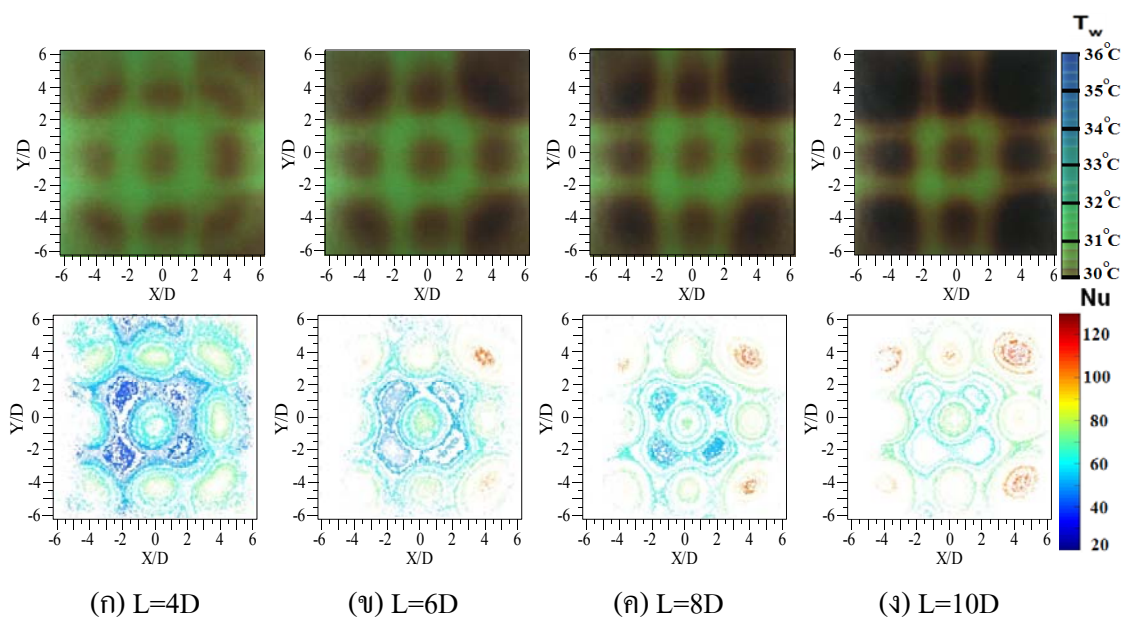
รูปที่ 4.36-4.39 แสดงผลกระทบของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท โดยภาพรวมของผลการทดลองพบว่า กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ และ $4D$ (รูปที่ 4.36 และ 4.38) และเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ (รูปที่ 4.39) เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีที่หมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ (รูปที่ 4.37) เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำลงและมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนไม่เป็นระเบียบ



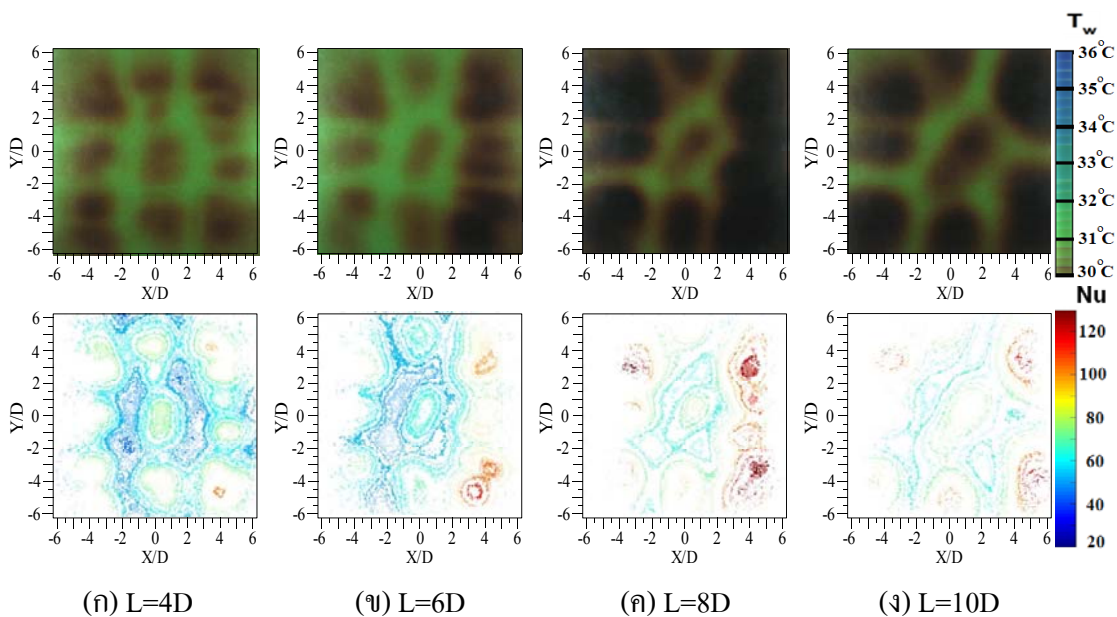
รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวนบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $S=2D$ ($\text{Re}=20,000$)



รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวนบน $T_j=28.5^\circ\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $S_w=0.40$ ระยะ $S=2D$ ($\text{Re}=20,000$)



รูปที่ 4.38 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวนบน $T_j=28.5^{\circ}\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีที่เงื่อนไขของเจ็ทจากท่อเปล่า ระยะ $S=4D$ ($\text{Re}=20,000$)

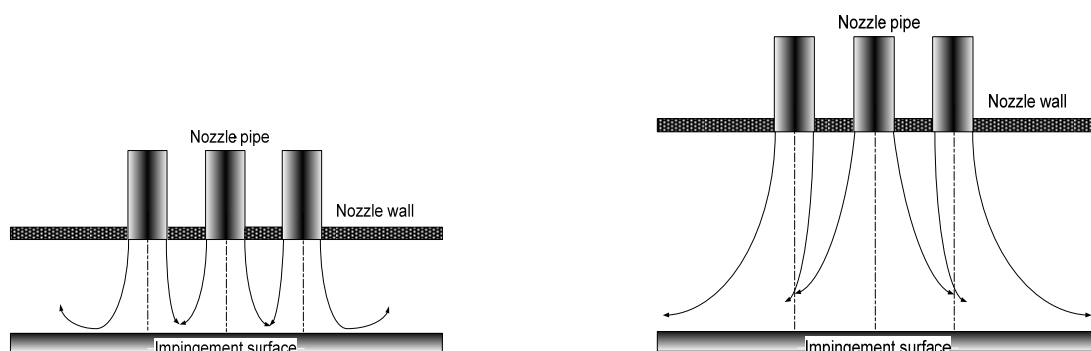


รูปที่ 4.39 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อน (แฉวนบน $T_j=28.5^{\circ}\text{C}$, $\dot{q}=207\text{ W/m}^2$) และกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว (แถวล่าง) กรณีของเจ็ทที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ระยะ $S=4D$ ($\text{Re}=20,000$)

รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของน้ำเซลดัดนัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่า ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ โดยเปรียบเทียบผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชน พบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชน $L=8D$ (รูปที่ 4.36 (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ แต่มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนแต่ละลำมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมาก ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีระยะ $L=10D$ (รูปที่ 4.36 (ง)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าที่ระยะ $L=8D$ แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอกว่าที่ระยะ $L=8D$ กรณีที่เพิ่มระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ (รูปที่ 4.38) ผลจากการเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนยังคงเกิดขึ้นลักษณะเดียวกับที่ระยะ $S=2D$ คือ เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น และที่ระยะ $L=10D$ (รูปที่ 4.38 (ง)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอมากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ โดยที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเดียวกัน

จากรูปที่ 4.36 (ก) แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่า ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ จากรูปพบว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทแต่ละลำตรงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแต่ละท่อเจ็ท สามารถสังเกตตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำอยู่ในช่วงพิกัด $X/D=\pm 2$ และ $Y/D=\pm 2$ ซึ่งตรงกับพิกัดของจุดศูนย์กลางระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท (ดูรูปที่ 4.40 (ก) ประกอบ) เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนทำให้พิกัดตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำเบี่ยงออกนอกตำแหน่งเดิม (ดูรูปที่ 4.40 (ข) ประกอบ) สังเกตได้ชัดที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชน $L=10D$ (รูปที่ 4.36 (ง)) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำอยู่ในช่วงพิกัด $X/D=\pm 3.5$ และ $Y/D=\pm 3.5$ ในกรณีที่เพิ่มระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ (รูปที่ 4.38) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำตรงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแต่ละท่อเจ็ท อยู่ในช่วงพิกัด $X/D=\pm 4$ และ $Y/D=\pm 4$ และที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น พบว่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิม จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงการเบี่ยงตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลางแต่ละลำ จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นที่เจ็ทพุ่งชนสูง เนื่องจากเป็นระยะที่เจ็ท

ขยายตัวได้มากก่อนพุ่งชนพื้นผิว และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย เป็นระยะที่เจ็ทเกิดการเบียดกัน และเกิดการผสมกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว



(ก) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ L ต่ำ

(ข) เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ L สูง

รูปที่ 4.40 แสดงการเบียดจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทที่อยู่ล้อมรอบเจ็ทตรงกลาง กรณีที่เงื่อนไขระยะ S น้อย และระยะ L สูง

รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ กรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ (รูปที่ 4.37 (ก)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอกว่ากรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ ในกรณีที่ระยะ $L=6D, 8D$ และ $10D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะลดลงและจะมีลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากเป็นช่วงที่ทำให้เจ็ทจะเกิดการผสมกันก่อนพุ่งชนพื้นผิว โดยเฉพาะที่ระยะ $L=10D$ (รูปที่ 4.37 (ง)) การผสมกันระหว่างเจ็ทเกิดขึ้นอย่างรุนแรงก่อนพุ่งชนพื้นผิว จึงไม่สามารถระบุบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิวได้ แต่ในกรณีที่ระยะ $S=4D$ (รูปที่ 4.39) การผสมกันระหว่างเจ็ทเกิดขึ้นน้อยลง สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนพื้นผิวได้ และที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเดียวกัน เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ระยะ $L=8D$ (รูปที่ 4.39 (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ

กรณีที่เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ (เปรียบเทียบรูปที่ 4.36 และ 4.37) พบว่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ $L=10D$ (รูปที่ 4.36 (ง)) และเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะ $L=4D$ (รูปที่ 4.37 (ก)) พบว่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของเจ็ททั้งสองกรณีมีลักษณะที่คล้ายกัน คือพื้นที่ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำบริเวณ

ระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชนมีขนาดแคบลง (การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้น) และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เกิดขึ้น แสดงถึงการไหลของเจ็ทที่อยู่ใกล้กันเกิดการผสมกันก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว กรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าจะเกิดปรากฏการณ์การผสมกันระหว่างเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิวที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสม่ำเสมอขึ้นที่ระยะ $L=10D$ แต่ในขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นที่ระยะ $L=4D$ และเมื่อระยะ $L=4D, 6D$ และ $8D$ จะเกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทมากขึ้นจนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดำลง

กรณีที่เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ (เปรียบเทียบรูปที่ 4.38 และ 4.39) พบว่าผลจากการเพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่าและเจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ เพิ่มขึ้น สำหรับเจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ $L=10D$ (รูปที่ 4.38 (ง)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอกว่าที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ ขณะที่เจ็ทหมุนควงที่เงื่อนไข $Sw=0.40$ ที่ระยะ $L=8D$ (รูปที่ 4.39 (ค)) อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอื่นๆ แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า

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

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของระดับการหมุนควงของเจ็ทที่มีต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในกรณีของเจ็ทลำเดี่ยวและกรณีกลุ่มของเจ็ทในการทดลองได้ใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อ 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 $Re=20,000$ และนอกจากนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วยวิธีเชิงทัศน เพื่อนำผลการทดลองมาใช้ในการอธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) จากผลการศึกษาโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำเดี่ยวพบว่า เจ็ทหมุนควงที่ไหลออกจากท่อจะแบ่งการไหลออกเป็นสองลำเอียงทำมุมกับแกนของเจ็ทเมื่อเจ็ทหมุนควงไหลพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นสองตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งแตกต่างกับกรณีของเจ็ทจากท่อเปล่าที่ตำแหน่งของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น กรณีที่เพิ่มสเวิร์ลนัมเบอร์ของเจ็ทมากขึ้นจะมีผลทำให้มุมของการไหลที่กระทำกับแนวแกนของเจ็ทเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อการแพร่กระจายของเจ็ทและการผสมกันระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆเพิ่มขึ้น และกรณีที่เพิ่มระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนทำให้โครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิวมีความซับซ้อน มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า และลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวซับซ้อนตามลักษณะการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว

(2) สำหรับผลของสเวิร์ลนัมเบอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดี่ยวพบว่า กรณีที่สเวิร์ลนัมเบอร์ $Sw=0.40$ และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ และ $4D$ เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าอัตราการ

ถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่าเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ส่วนบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชน อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงและเจ็ทจากท่อเปล่าแตกต่างกันไม่มาก กรณีที่เพิ่ม สเวิร์ลนัมเบอร์เป็น $Sw=0.62$, 0.78 และ 0.94 จะทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำลง โดยเฉพาะที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=8D$ และ $10D$ ผลจากการไหลพุ่งชน พื้นผิวของเจ็ทลดลงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควงต่ำกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อเปล่า

(3) สำหรับผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทที่ ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ และ $4D$ การใช้เจ็ทหมุนควงแทนเจ็ทจากท่อเปล่าสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทแต่ละลำพุ่งชนและบริเวณรอบๆที่เจ็ทพุ่งชน โดยเฉพาะที่เงื่อนไข สเวิร์ลนัมเบอร์ $Sw=0.40$ และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ และ $4D$ กรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$ และ $8D$ เจ็ทหมุนควงสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน สูงกว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่าเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ส่วนบริเวณรอบๆที่เจ็ท พุ่งชน อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทหมุนควงและเจ็ทจากท่อเปล่าแตกต่างกันไม่มาก

(4) สำหรับผลการทดลองการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ทที่ สเวิร์ลนัมเบอร์ $Sw=0.62$, 0.78 และ 0.94 อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่ำกว่าอัตราการถ่ายเท ความร้อนของเจ็ทจากท่อเปล่า โดยเฉพาะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ท พุ่งชน $L=6D$, $8D$ และ $10D$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ และ $4D$ เนื่องจากเกิดการผสม ระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กันก่อนพุ่งชนพื้นผิว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลจากการเพิ่มการหมุนควงในการไหลของเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพียงเบื้องต้น ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มขอบเขตในการทำวิจัยดังนี้

- (1) ศึกษากรณีกลุ่มของเจ็ทที่มีการจัดเรียงเป็นแบบเชิงศูนย์กลางระหว่างลำเจ็ทซึ่งปรกติในกรณีกลุ่มของเจ็ทแบบไม่หมุนควงที่มีการจัดเรียงของลำเจ็ทด้วยวิธีดังกล่าวจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในบริเวณระหว่างจุดที่เจ็ทพุ่งชน
- (2) ลดความยาวของแผ่นบีดที่สอดในท่อเจ็ท ซึ่งวิธีดังกล่าวจะทำให้ความดันที่สูญเสียในระบบลดลง
- (3) ศึกษาผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทหมุนควง
- (4) วัดการกระจายความเร็วและระดับของความปั่นป่วนของเจ็ทเพื่อเป็นข้อมูลในการอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ท

บรรณานุกรม

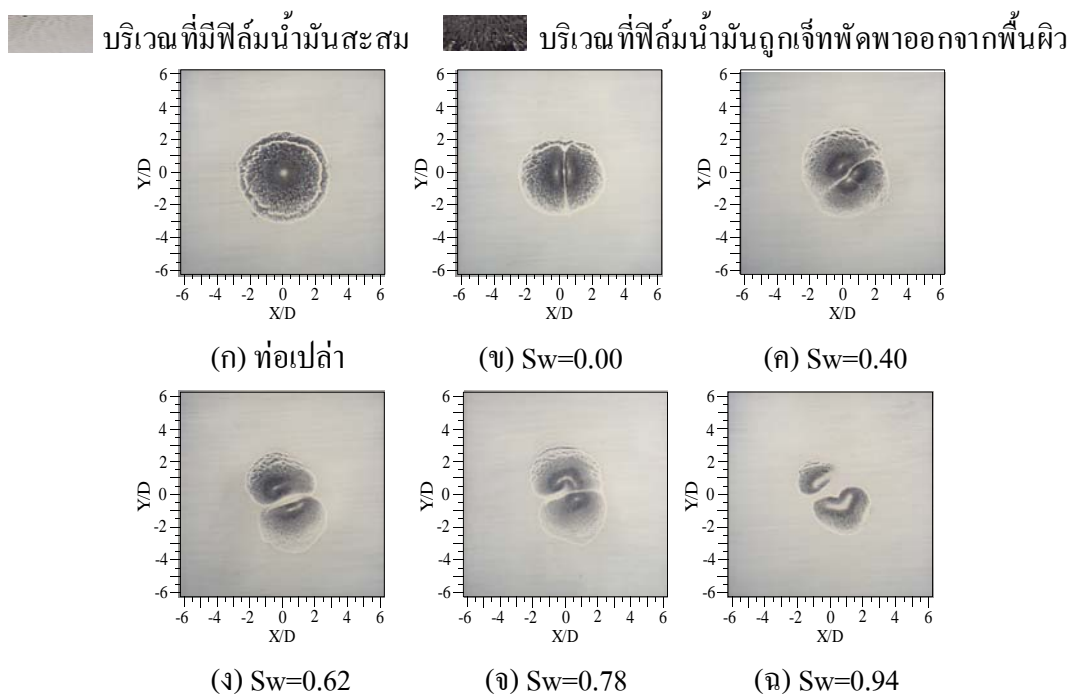
- [1] Patent US 5,533,864, 1994, “Turbine cooling blade having inner hollow structure with improved cooling”.
- [2] Patent US 6,000,908, 1999, “Cooling for double-wall structures”.
- [3] Patent US 5,329,994, 1994, “Jet impingement heat exchanger”.
- [4] Patent US 4,494,171, 1985, “Impingement cooling 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 Durˆao, 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] Viskanta, R., 1993, "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp 111–134.
- [20] 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.

- [21] 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.

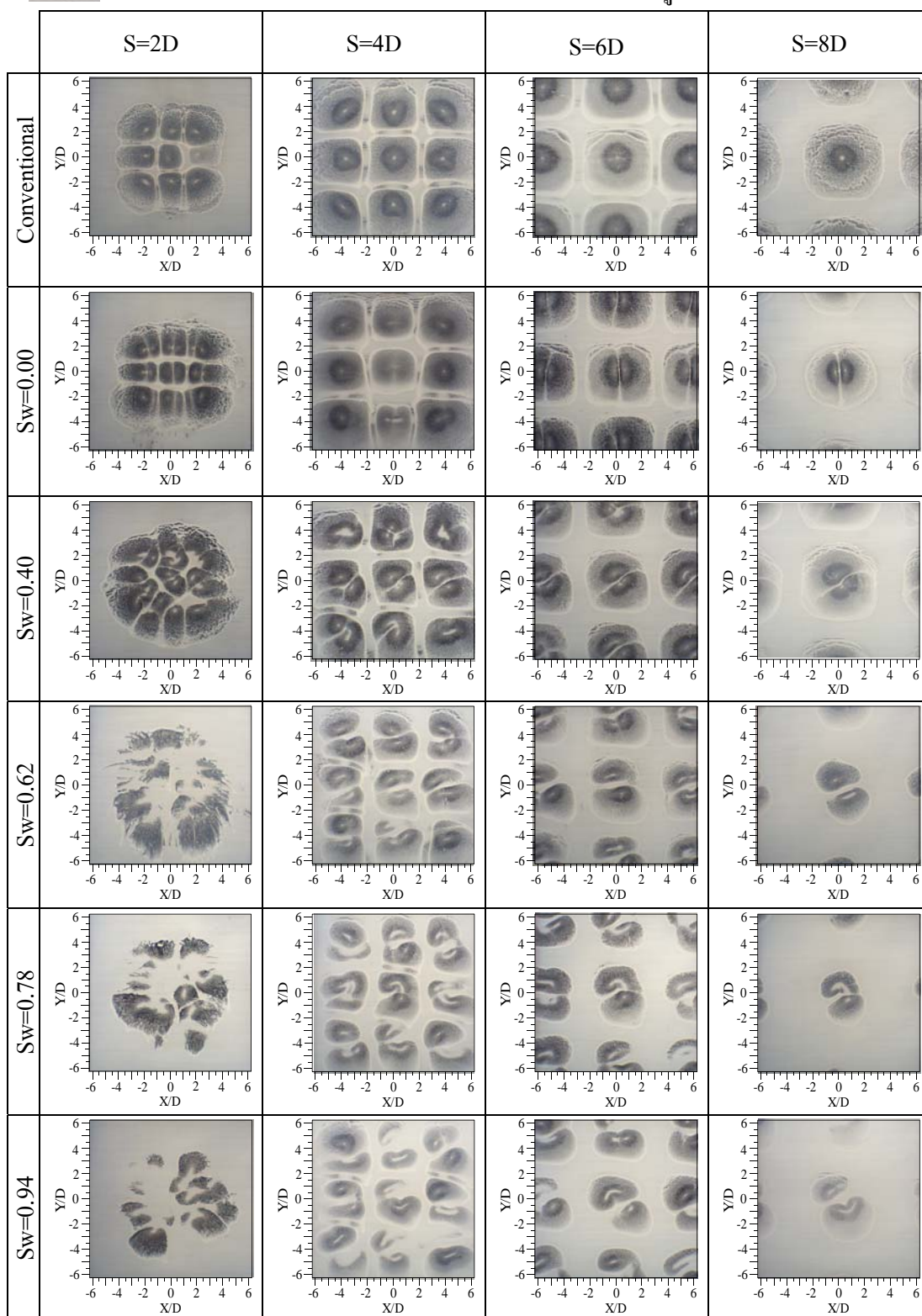
ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน



รูปที่ ๑๑ 1 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียวที่เงื่อนไขสเปิร์ลนัมเบอร์ต่างๆ และระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$, ระยะเวลาหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน 270 sec)

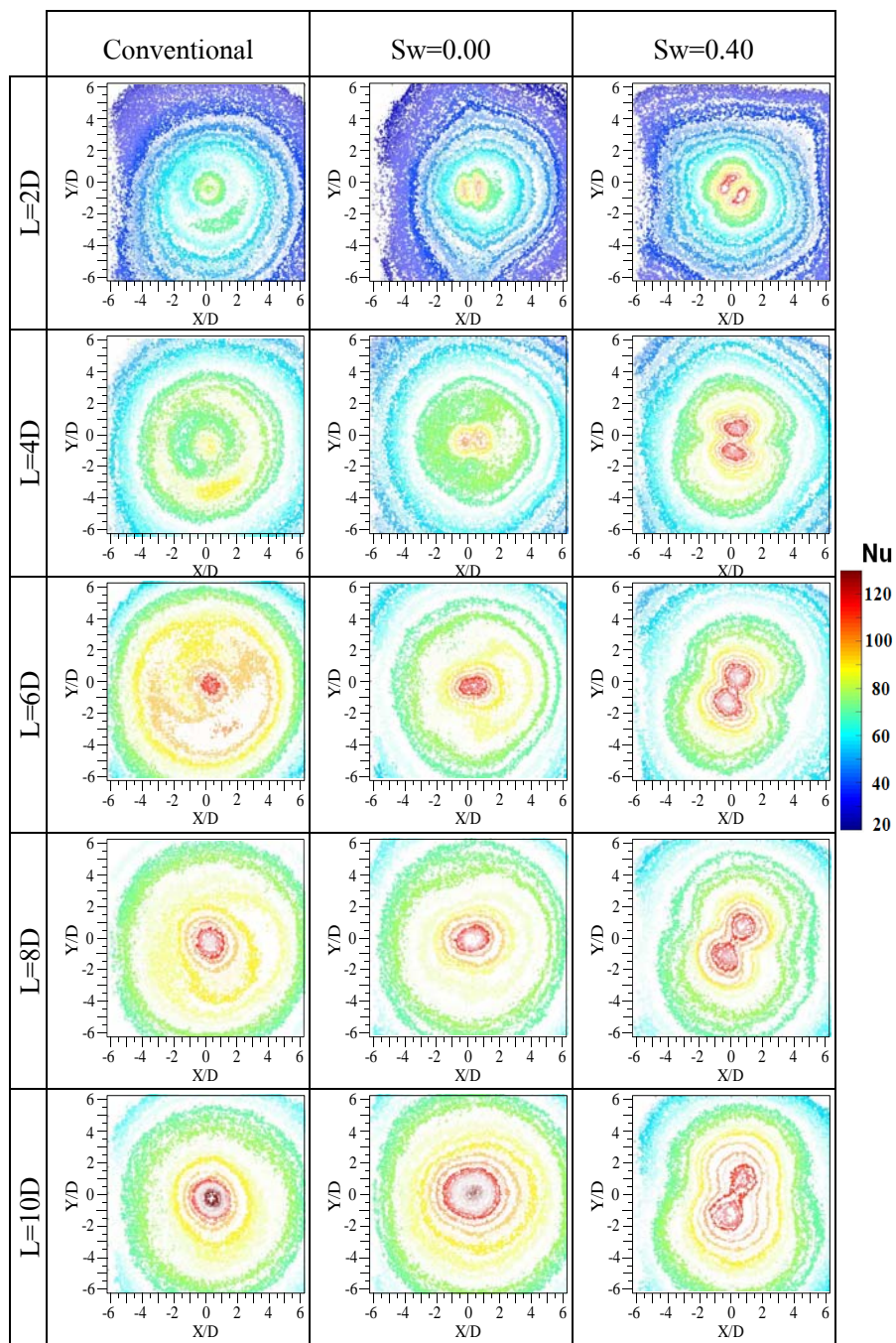
บริเวณ ที่มีฟิล์มน้ำมันสะสม บริเวณ ที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจี๊พพัดพาออกจากพื้นผิว



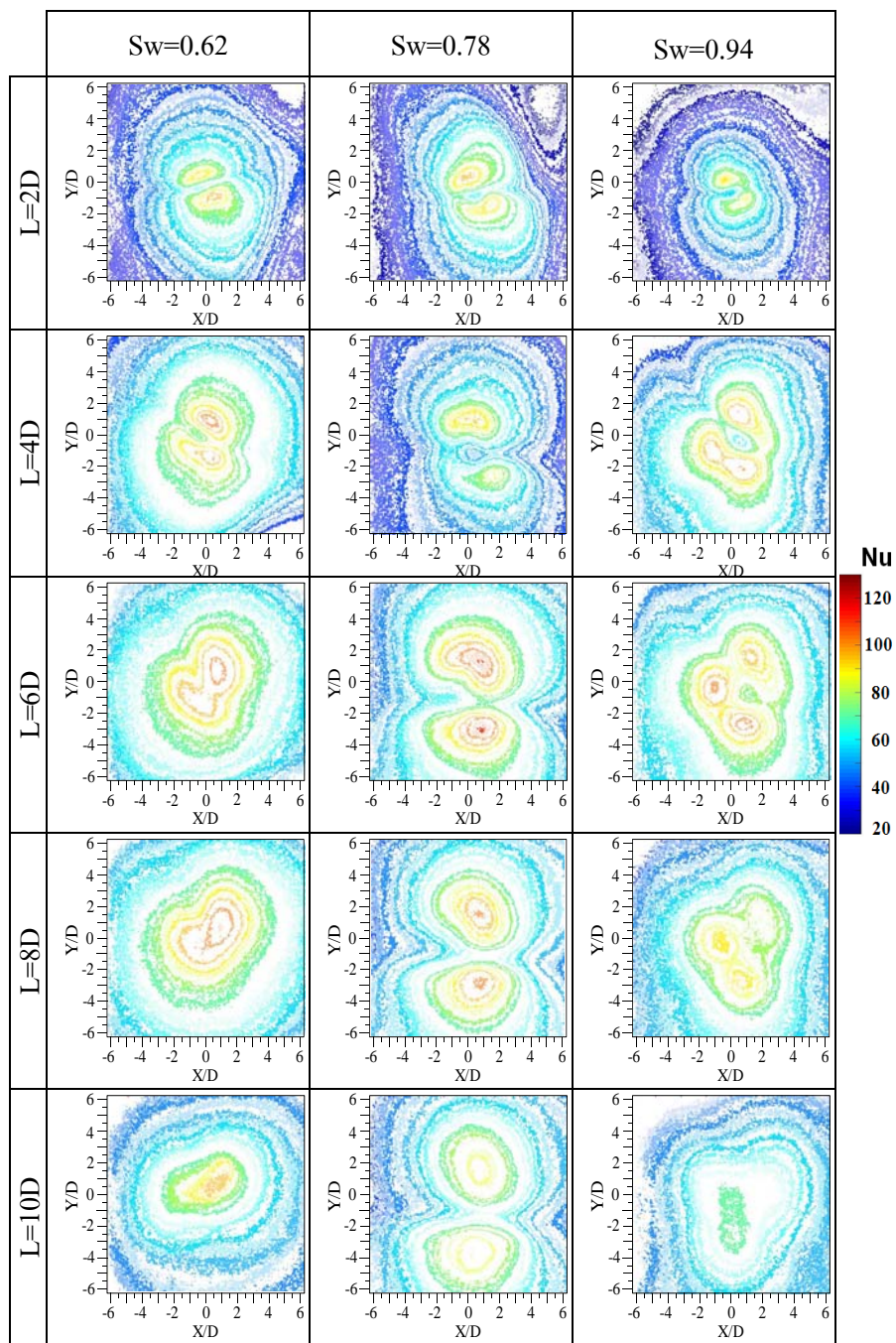
รูปที่ ๒ แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณีของกุ่มของเจี๊พที่เงื่อนไขของ ไชสเวิร์ด นัมเบอร์ต่างๆ และระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$, ระยะเวลาหลังจากที่เจี๊พพุ่งชน 270 sec)

ภาคผนวก ข

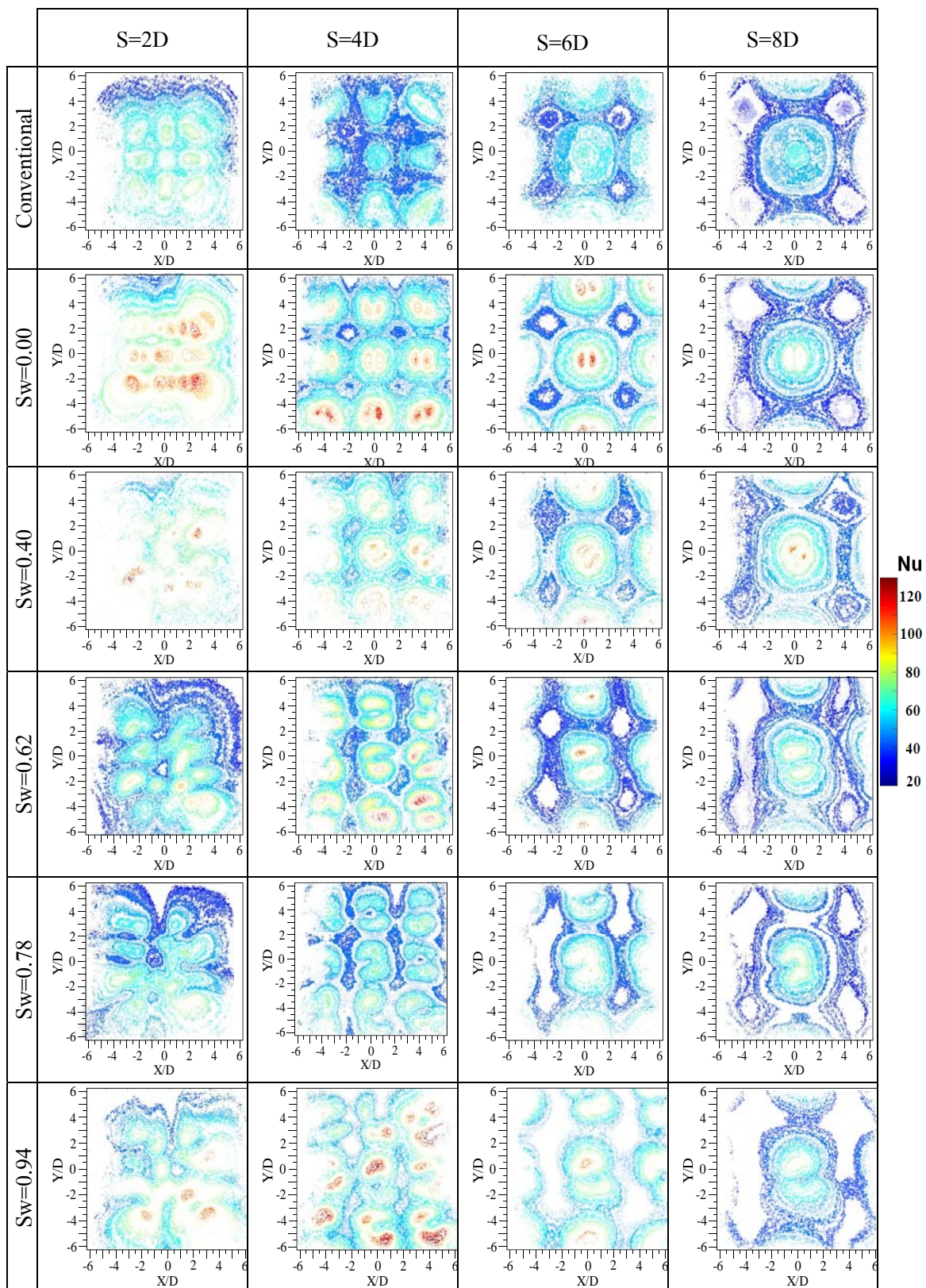
ผลการศึกษการถ่ายเทความร้อนของเจ้ทบนพื้นผิว



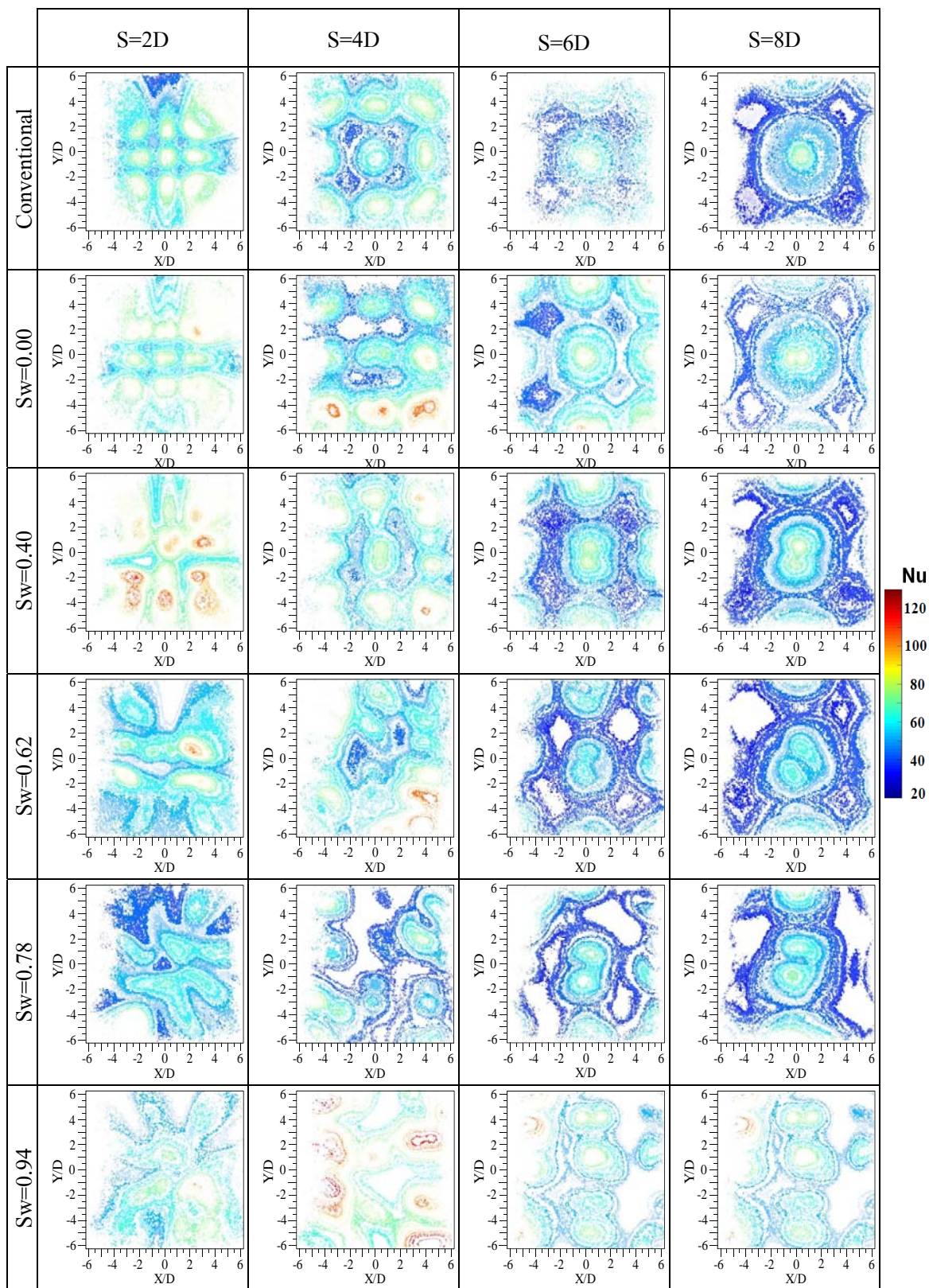
รูปที่ ๑๖ ๑ แสดงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดี่ยว ($Re=20,000$)



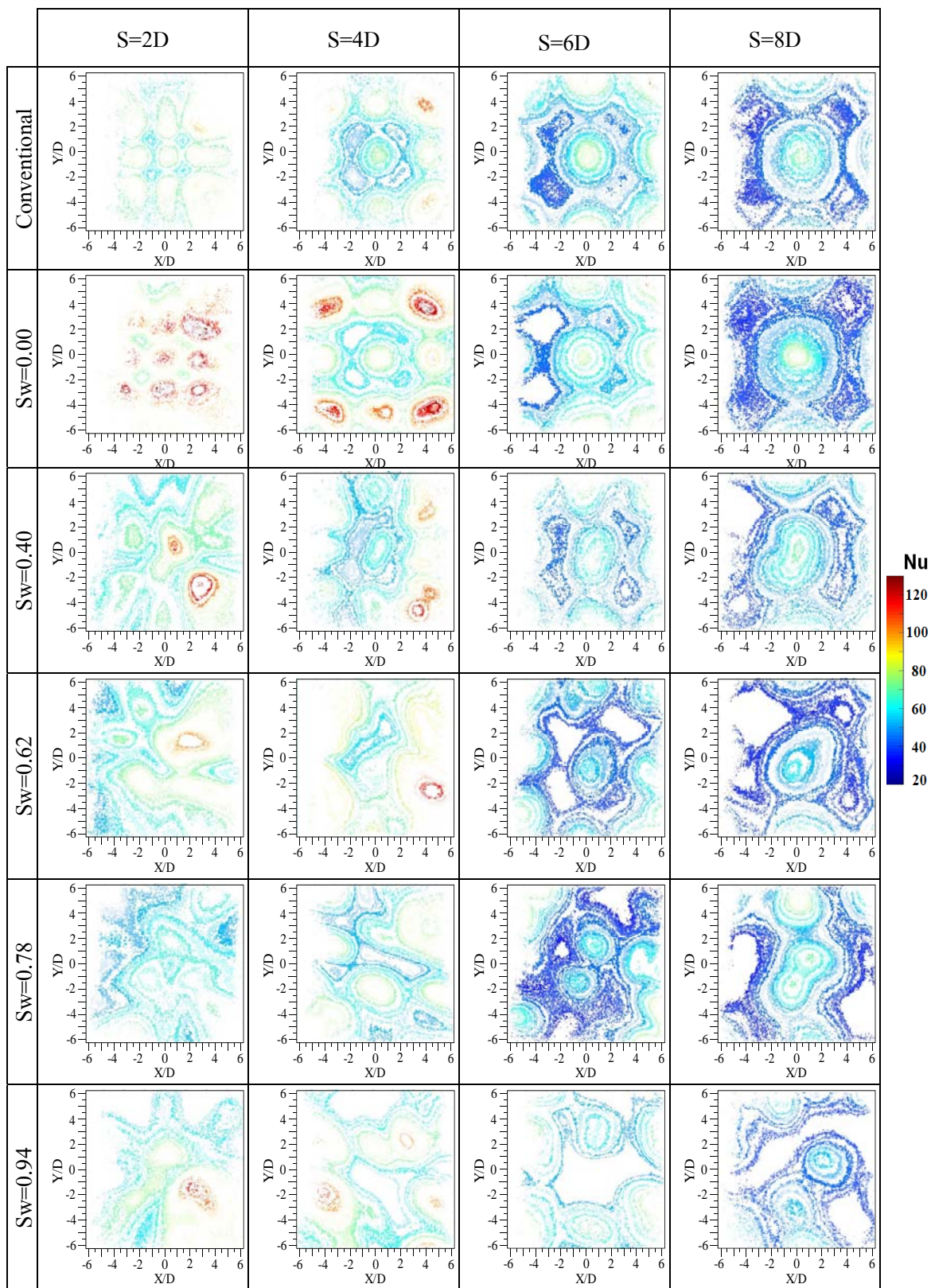
รูปที่ ๒ แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดี่ยว ($Re=20,000$)



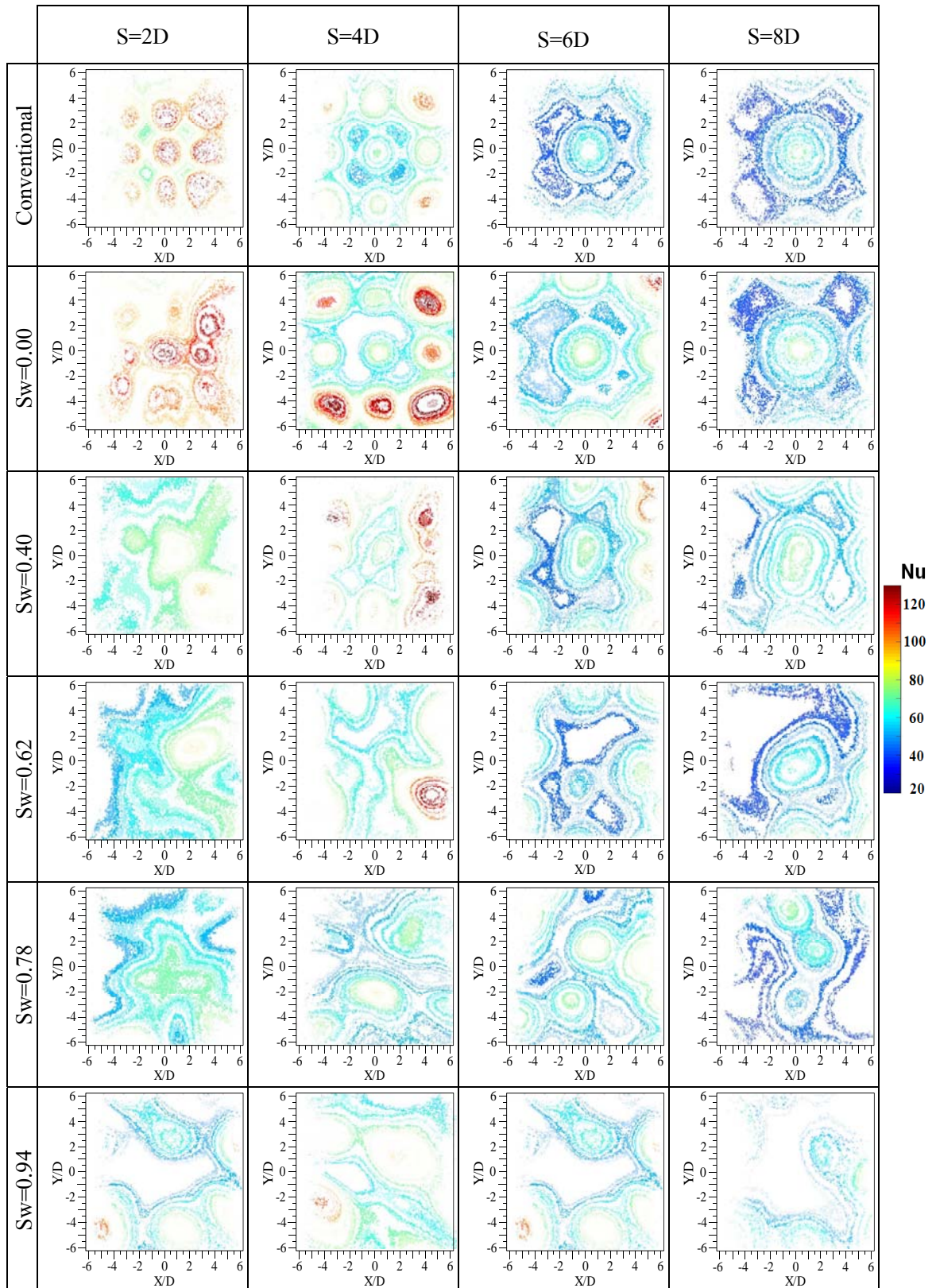
รูปที่ 3 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=2D$ ($Re=20,000$)



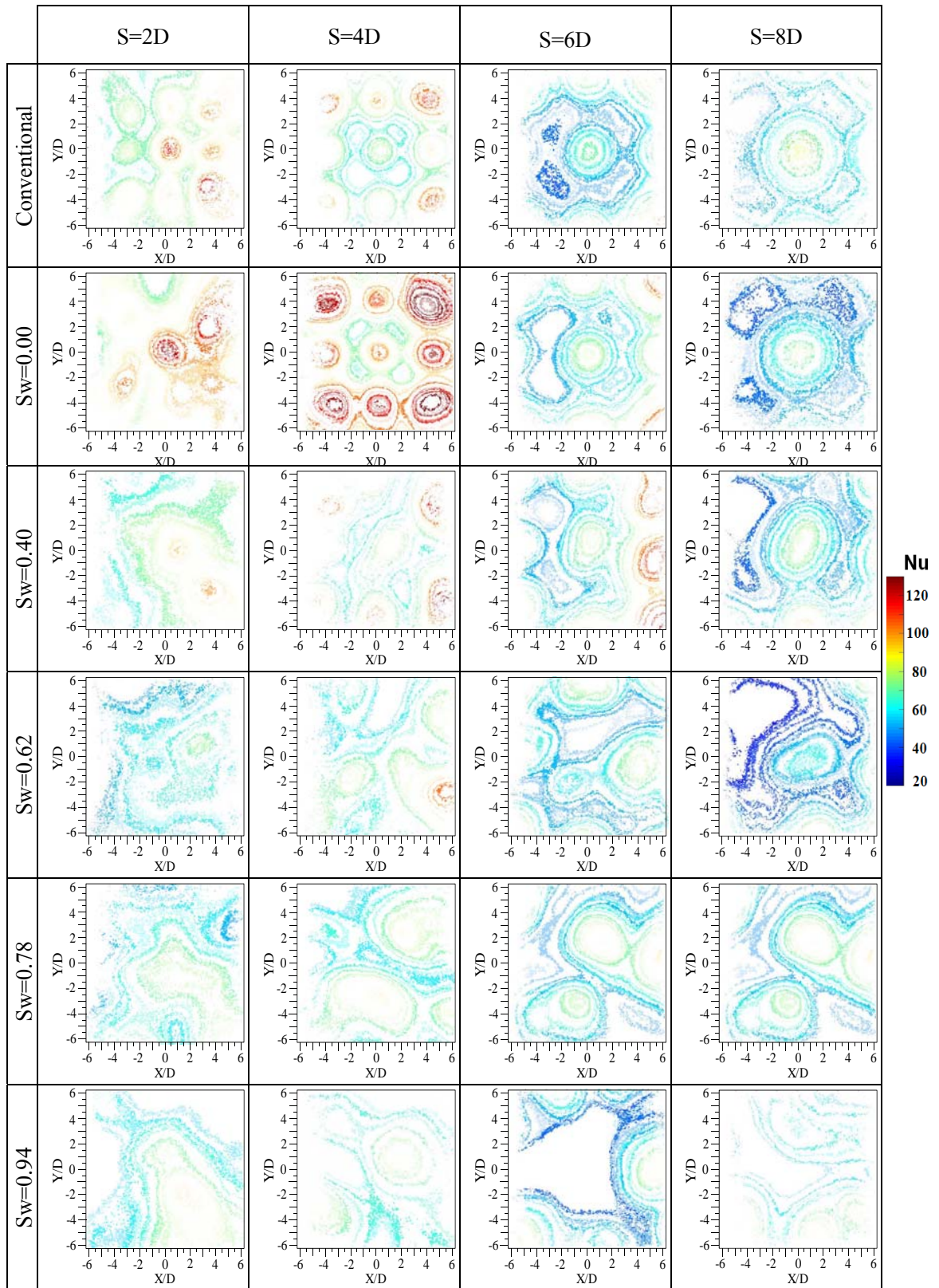
รูปที่ ๓๔ แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของท่อของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=4D$ ($Re=20,000$)



รูปที่ ๕ แสดงการกระจายของนั้สเชิิตต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=6D$ ($Re=20,000$)



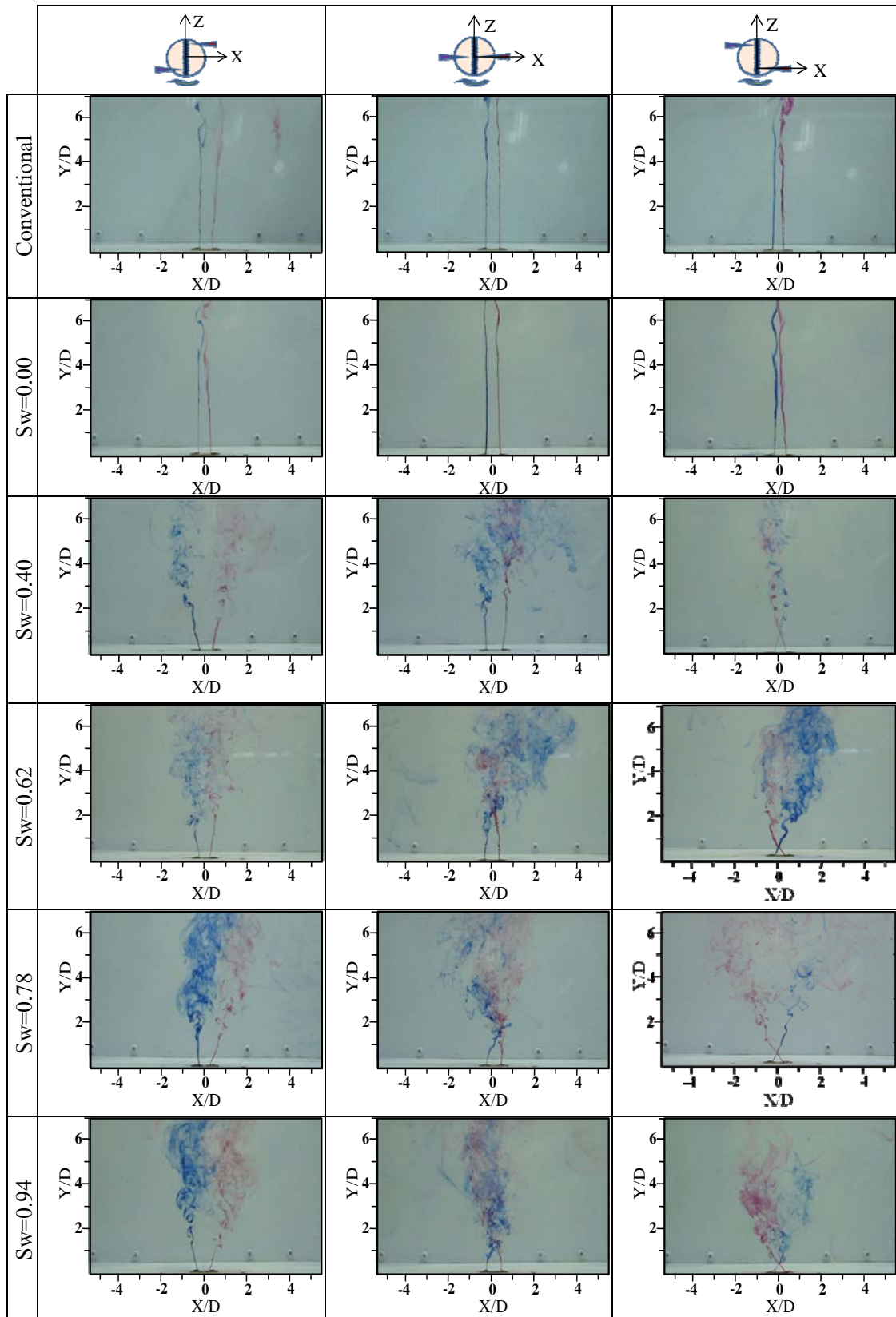
รูปที่ 6 แสดงการกระจายของนั้สเชลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกั้มของเจ้ท
ที่เงื่อนไ้ระยะ $L=8D$ ($Re=20,000$)



รูปที่ ๗ แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของกลุ่มของเจ็ท
ที่เงื่อนไขระยะ $L=10D$ ($Re=20,000$)

ภาคผนวก ค

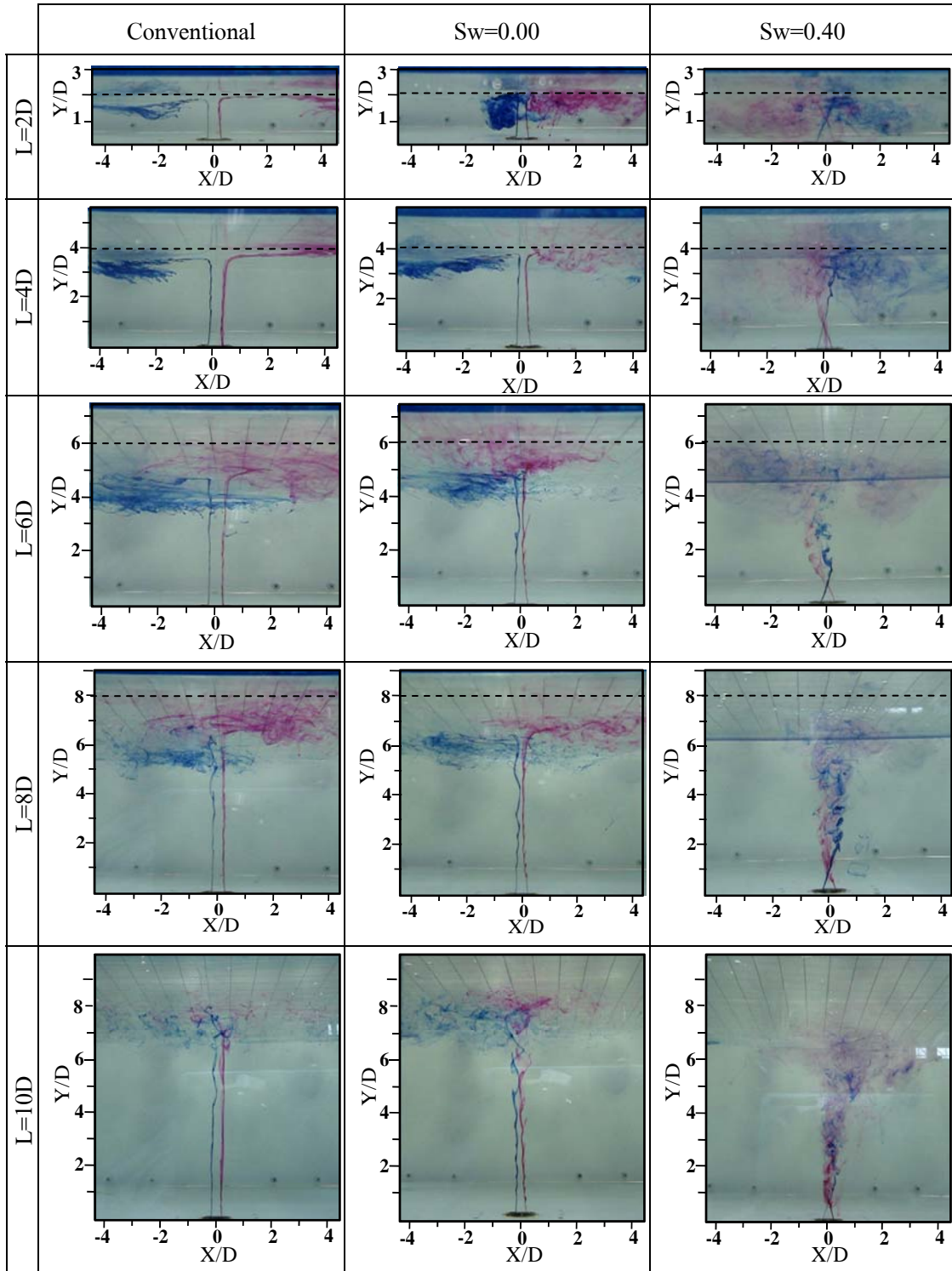
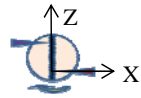
ผลการศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ้าหน้าที่อิสระ



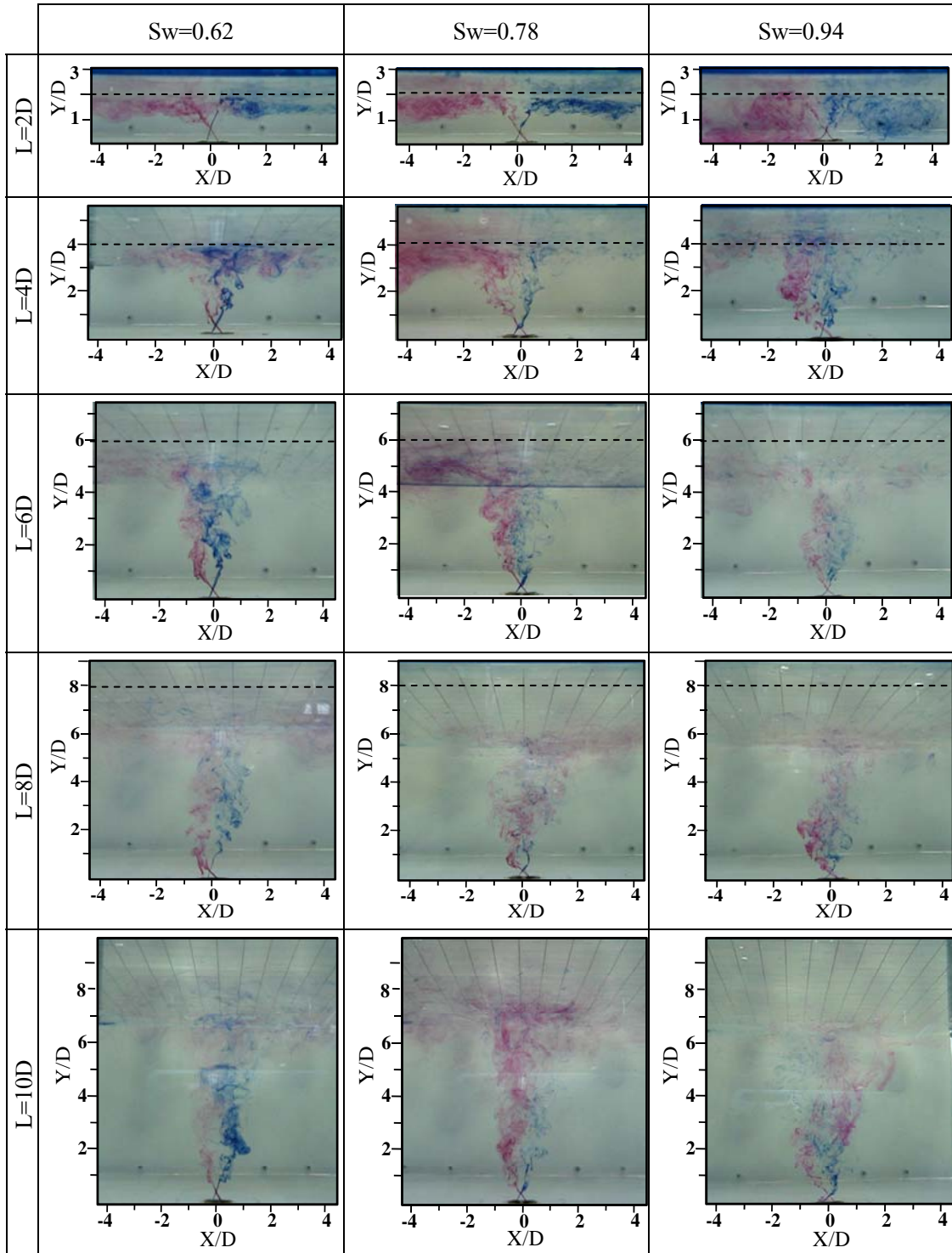
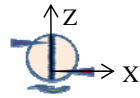
รูปที่ ๑๑ 1 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำอิสระกรณีที่ทำวงเข็มชนิดสี่ที่ปากทางออกท่อเจ็ท
แบบต่างๆ ($Re=760$)

ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาโครงการไถลของเจ้าหญิงชนพื้นผิว



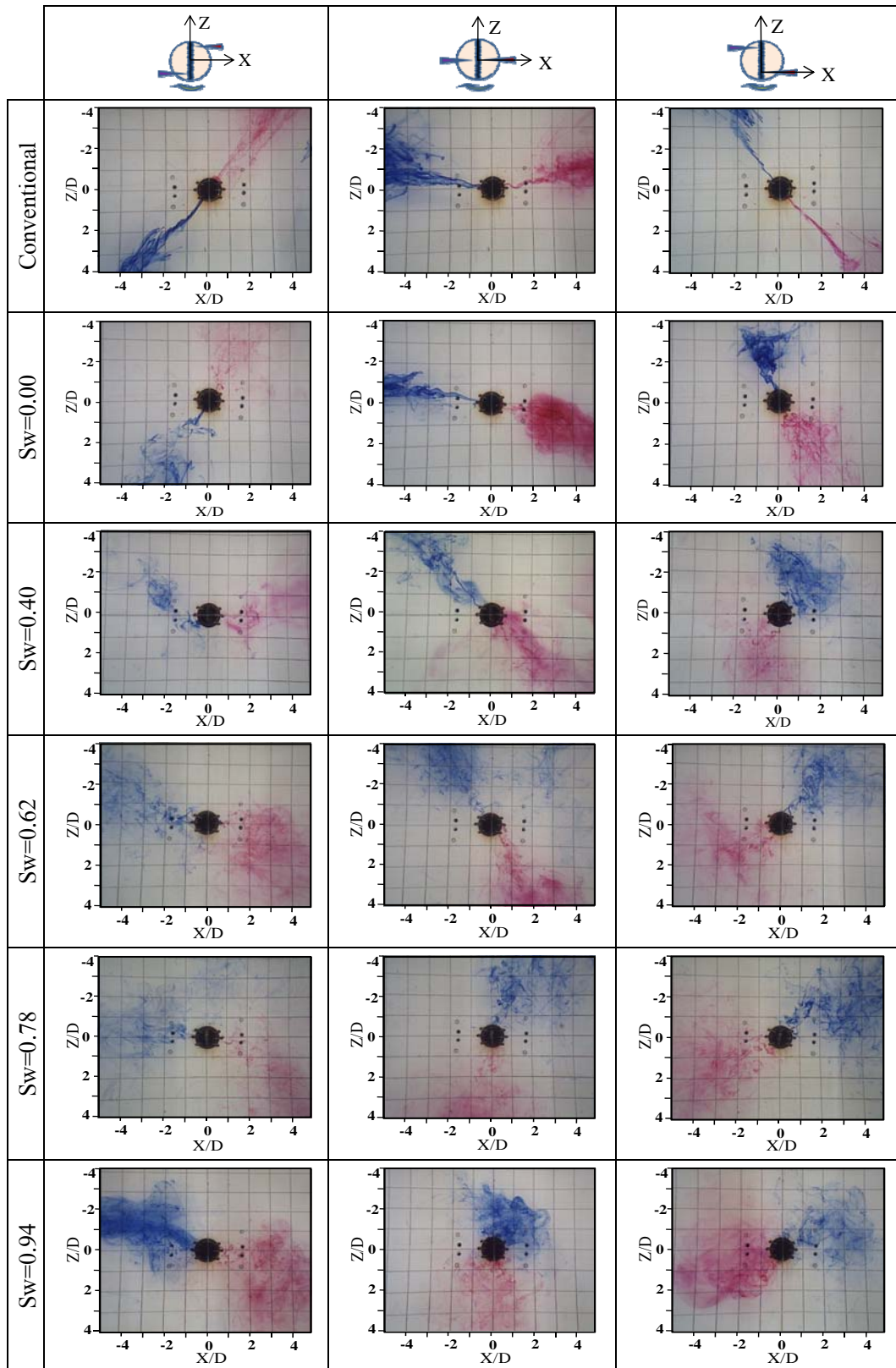
รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่พุ่งชนพื้นผิวกรณีที่วางเข็มฉีดยาที่ปากทางออกท่อ เจ็ทแบบต่างๆ ($Re=760$, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)



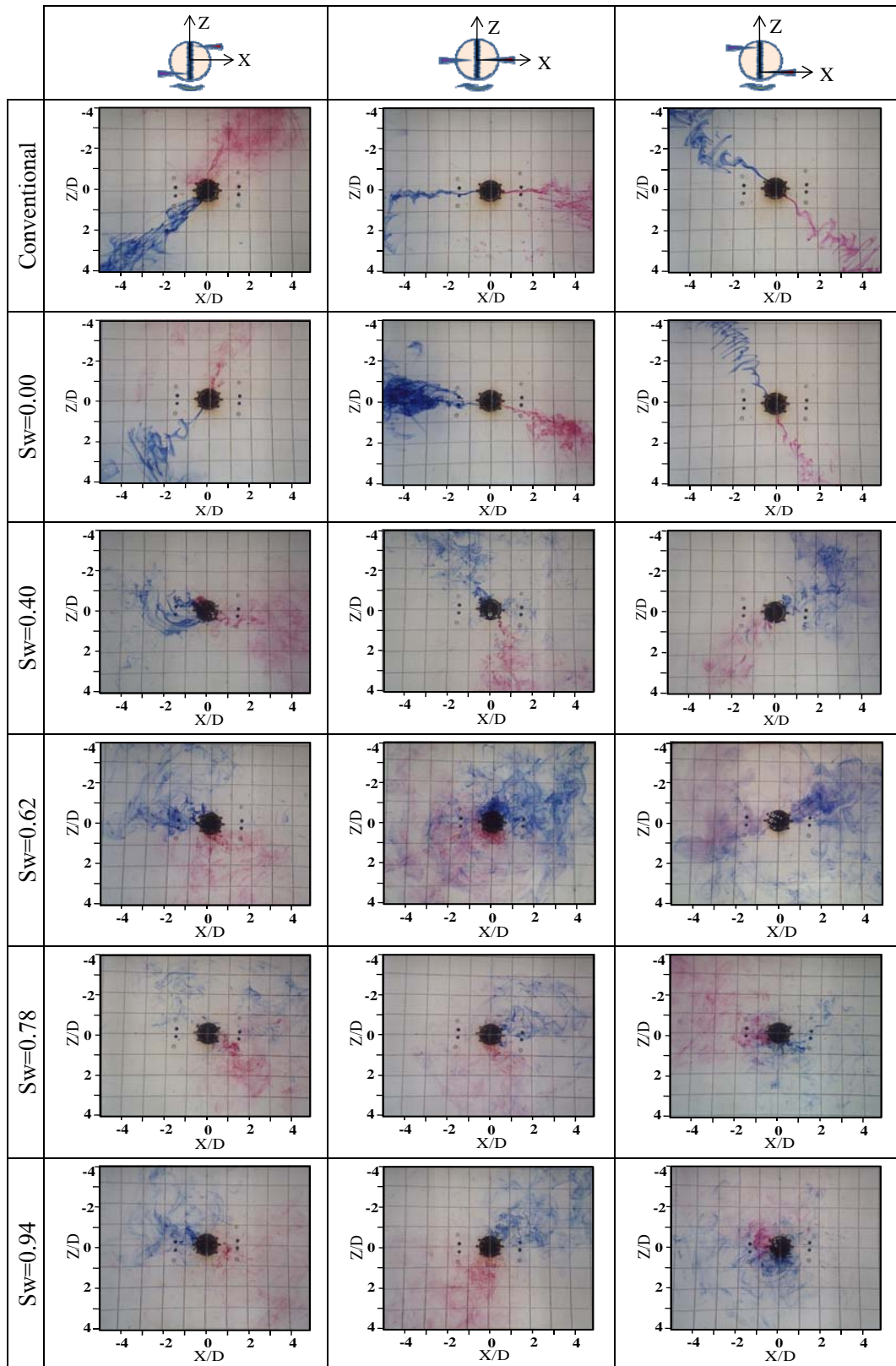
รูปที่ ๒ แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็มน้ำที่พุ่งชนพื้นผิวกรณีที่วางเข็มฉีดสีที่ปากทางออกท่อ
 เจ็บบางๆ ($Re=760$, เส้นประแสดงตำแหน่งของพื้นผิวที่เจ็มน้ำพุ่งชน)

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาระยะยาวของเจ้าหน้าที่บนพื้นผิว



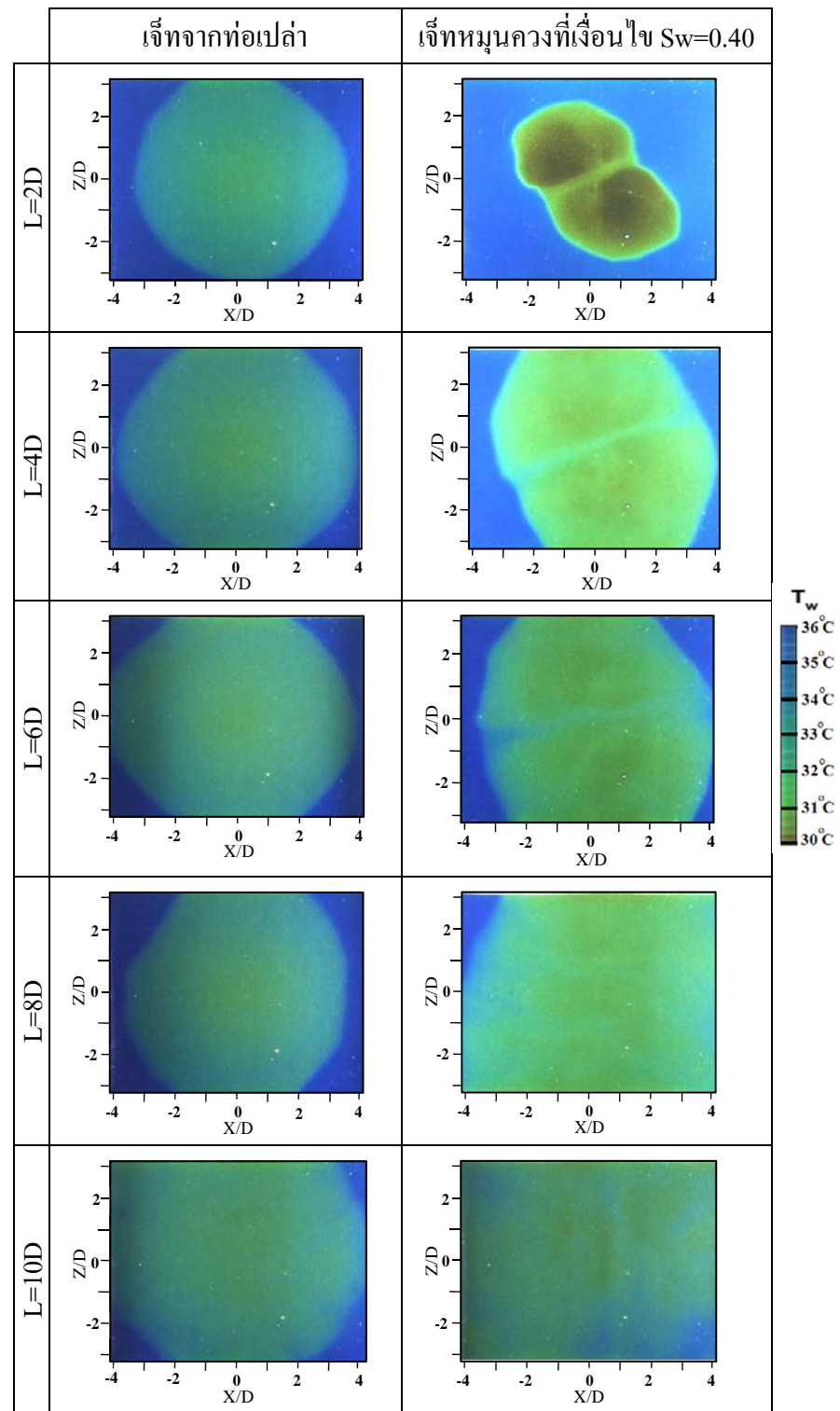
รูปที่ ๑ แสดงการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำกรณที่วางเข็มฉีดยาที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ
ระยะ $L=2D$ ($Re=760$, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)



รูปที่ ๒ แสดงการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำกรณที่วางเข็มฉีดยาที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบต่างๆ
 ระยะ $L=4D$ ($Re=760$, ถ่ายรูปด้านหลังของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน)

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ้าหน้าที่



รูปที่ ๑๓ ๑ แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทน้ำกรณิเจ็ทลำเดี่ยว
 ($\dot{q} = 447 \text{ W/m}^2$, $T_j = 30^\circ\text{C}$, $Re = 760$)

ภาคผนวก ข

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว
ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

ภข 1 โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างกราฟการแยกตัวประกอบสี rgb ภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```

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

```

} กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```

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

```

} ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB

```

% crop
imaged=imcrop(image,rect);

```

} ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```

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

```

} ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```

% 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
rlav=sum(r(:))/numel(r);
glav=sum(g(:))/numel(g);
blav=sum(b(:))/numel(b);

```

} ทำการหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรสี RGB ที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ

ภข 2 โปรแกรม MATLAB สำหรับหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

```
% 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];
```

กำหนดพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

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

หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจาก
สมการ (3.8)

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

สร้างเมตริกซ์ M ที่มีเลขศูนย์ทั้งหมด ซึ่งมีขนาด
จำนวนพิกเซลด้านกว้างและด้านยาวเท่ากับขนาด
ของพิกัดที่แสดงเป็นภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิด
คริสตัล

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

ป้อนภาพแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลเข้าโปรแกรม MATLAB

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

ทำการตัดภาพให้เหลือเฉพาะที่แสดงเป็นแผ่น
เทอร์โมลิกวิดคริสตัล

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

กำหนดตัวแปรเพื่อแทนจำนวนพิกเซลด้านกว้าง
และด้านยาวของภาพแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```

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

```

ทำการแยกสี RGB ที่ปรากฏบนแผ่น
เทอร์โมลิกวิดคริสตัล

```

%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 ให้ตรงกับที่
แสดงในเงื่อนไขในสมการ
(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
end

```

หาเส้นสีเหลืองที่ปรากฏบนแผ่น
เทอร์โมลิกวิดคริสตัล โดยสร้าง
เงื่อนไขที่ค่า r ใกล้เคียงกับค่า g
แล้วแทนค่านัสเซลต์นัมเบอร์ลงใน
ในแมตริกส์ M ให้ตรงกับพิกัดของ
เส้นสีเหลือง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายมังกร แวหะยี	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010120058	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2550

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนผู้ช่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี 2550-2552

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

มังกร แวหะยี และ ชยุติ นันทดุสิต, 2551, “การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 6, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 676-681.

มังกร แวหะยี, ชยุติ นันทดุสิต, และ อสิ บุญจิตราดุลย์, 2551, “การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทกลุ่มที่พุ่งชนพื้นผิว”, การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

มังกร แวหะยี, ชยุติ นันทดุสิต, และ อสิ บุญจิตราดุลย์, 2551, “การศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ”, การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 158-163.

มังกร แวหะยี, ชยุติ นันทดุสิต, และ อสิ บุญจิตราดุลย์, 2551, “การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กลุ่มเจ็ทหมุนควงพุ่งชน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, หน้า 384-389.

มังกร แวหะยี และ ชยุติ นันทดุสิต, 2552, “การศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทหมุนควงที่พุ่งชนผนังด้วยวิธีเชิงทัศน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 590-595.