



การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะพุ่งชน
Heat Transfer Enhancement on Surface by Using Pulsating Jet Impingement

เอกพจน์ วิเชียรโชติ

Ekkapot Vichianchot

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
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**

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทแบบไหลเป็น
 จังหวะพุ่งชน

ผู้เขียน นายเอกพจน์ วิเชียร โชติ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุลิต)

.....ประธานกรรมการ
 (ดร.นันทพันธ์ นภทรานันท์)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุลิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
 (ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ
 (ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมเครื่องกล

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และ
ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ _____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทกุลสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ _____

(นายเอกพจน์ วิเชียรโชติ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ _____

(นายเอกพจน์ วิเชียร โชติ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะพุ่งชน
ผู้เขียน	นายเอกพจน์ วิเชียร โชติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์ของเพื่อเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะพุ่งชน ในการทดลองได้ใช้บอลวาล์วทำการเปิดปิดท่อส่งอากาศเพื่อควบคุมการไหลแบบสั้นของเจ็ท เบื้องต้นได้ทำการศึกษากรณีที่ใช้เจ็ทอากาศลำเดียว จากนั้นได้ศึกษากรณีของเจ็ทกลุ่ม 9 ลำ ที่มีการจัดเรียงของออริฟิสแบบแถวแนวเดียวกัน 3 แถว แถวละ 3 ลำ พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบ นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง สำหรับตัวแปรในการทดลองประกอบด้วย ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D$ และ $8D$ ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D, 4D$ และ $6D$ โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $D=16 \text{ mm}$ ความถี่ของการสั้น $f=0 \text{ Hz}, 4.5 \text{ Hz}, 9.25 \text{ Hz}, 19 \text{ Hz}, 28.5 \text{ Hz}$ คำนวณเป็นสโตว์ฮาวล์นัมเบอร์ $St=0, 0.0074, 0.0152, 0.0312, 0.0472$ โดยในแต่ละการทดลองกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทคงที่เท่ากับ $Re=12,000$ สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิวคิวิตคริสตัลวัดการกระจายของอุณหภูมิ และวิเคราะห์การกระจายของนัสเซิลท์นัมเบอร์บนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ และศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยใช้เทคนิคฟิล์มน้ำมัน และวัดความเร็วของเจ็ทโดยใช้เครื่องวัดลมแบบลวดร้อน เพื่อวัดการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ นอกจากนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลเพื่อศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทไหลปะทะ

ในกรณีของเจ็ทลำเดียวพบว่า เมื่อความถี่การสั้นเพิ่มขึ้น เจ็ทมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างต่อเนื่องและมีความปั่นป่วนเจ็ทเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทไหลแบบสั้นจังหวะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องที่ $L=6D$ เฉพาะที่เงื่อนไข $St=0.0312$ และ 0.0472 เพิ่มขึ้น 2.93%, 3.37% ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองกรณีของกลุ่มเจ็ทพบว่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะสูงกว่าเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องที่กรณี $S=2D, L=2D, St=0.0152$ และ 0.0312 เพิ่มขึ้น 9.73%, 12.48% และกรณี $S=4D, L=6D, St=0.0312$ เพิ่มขึ้น 2.71 % และกรณี $S=6D, L=4D, St=0.0312$ เพิ่มขึ้น 3.29% กรณี $S=6D, L=6D,$

$St=0.0472$ เพิ่มขึ้น 1.38% และกรณี $S=6D$, $L=8D$, $St=0.0074$, 0.0152 , 0.0312 และ 0.0472 เพิ่มขึ้น 11.61%, 5.64%, 8.63% และ 1.57% ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะการไหลของเจ็ทแบบสั้นเป็นจังหวะที่ได้จากการจำลองการไหลมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเป็นรูปคลื่นตามเวลาติดต่อกันตามความถี่การสั่นของเจ็ท เมื่อเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดกระแสหมุนวน ซึ่งจุดศูนย์กลางของกระแสหมุนวนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแนวรัศมีของเจ็ท เมื่อเวลาเปลี่ยนไป กระแสหมุนวนจะรบกวนการไหลของกระแสหมุนวนก่อนหน้าที่มีความเร็วลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดพุ่งชนเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ชั้นขอบเขตที่เกิดจากการไหลที่มีความเร็วลดลงถูกทำลายโดยการไหลแบบเป็นจังหวะ ทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณเจ็ทผนังเพิ่มสูงขึ้น และในกรณีของกลุ่มเจ็ทที่มีลักษณะการไหลเช่นเดียวกับเจ็ทลำเดี่ยว และการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะทำให้ปัญหาการชนกันของเจ็ทผนังลดน้อยลง เมื่อระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$, $6D$ และลดปัญหาการจำกัดการไหลของลำเจ็ท เมื่อระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$

Thesis Title	Heat Transfer Enhancement on Surface by Using Pulsating Jet Impingement
Author	Mr.Ekkapot Vichianchot
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2012

ABSTRACT

The purpose of this research is to enhance heat transfer rate on the surface with pulsating jet impingement. The experiments were conducted using ball valve to opened and closed to generate the pulsed jet flow. In the experiment, the case of single jet impingement was studied and then the case of 3x3 inline array of impinging jets with 3 rows and 3 columns was studied. In addition, the case of continuous impinging jet was also studied for comparison. For the variables in study include the nozzle-to-impinged surface distance $L=2D$, $4D$, $6D$ and $8D$, distance between jets $S=2D$, $4D$ and $6D$ (D is the diameter of jet at 16 mm.) pulsating frequency $f=0$ Hz, 4.5 Hz, 9.25 Hz, 19 Hz, 28.5 Hz which calculated in Strouhal number $St=0$, 0.0074, 0.0152, 0.0312, 0.0472. All of experiments were carried out at constant jet Reynolds number of 12,000. For heat transfer measurement, temperature distributions on impinged surface were visualized 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. The velocity of jet flow was measured by using hot wire probe for measuring the distribution of velocity and turbulence intensity of free jet flow. In addition, Computational fluid dynamics software was used for studying the flow pattern of jet impingement.

In case of the single impinged jet, when the pulsating frequency increased, the jet flow change velocity continuously and the turbulence intensity in jet increases. The heat transfer on impinged surface with pulsed impinging jet increases slightly when compare with continuous impinging jet at $L=6D$ for case of $St=0.0312$ and 0.0472 , increased 2.93%, 3.37% respectively. For case of array impinging jets, the heat transfer coefficient on surface for pulsating impinging jets is higher than case of continuous impinging jet for case of $S=2D$, $L=2D$, $St=0.0152$ and

0.0312, increased 9.73%, 12.48% and case of $S=4D$, $L=6D$, $St=0.0312$, increase 2.71% and case of $S=6D$, $L=4D$, $St=0.0312$, increased 3.29% and case of $S=6D$, $L=6D$, $St=0.0472$, increased 1.38% and case of $S=6D$, $L=8D$, $St=0.0074$, 0.0152, 0.0312 and $St=0.0472$, increased 11.61%, 5.64%, 8.63%, 1.57% respectively. This is due to change of velocity with time according to frequency of pulsating jet via simulation results. When the jet flow impinged surface, it generated circulation flow which the center of circulation flow move in radial direction of jet. The generated circulation flow will disturb the previous circulation flow with deceleration as the jet impingement distance increase. This affected on boundary layer with low velocity which destroyed by pulsating flow and enhance the heat transfer on jet impingement region. For case of array of impinging jets, it found the same effect with case of single impinging jet. The pulsating jet flow can improve the problem of impingement between wall jet flow for case of $S=4D$, $6D$ and reduce the confined problem for case of $S=2D$.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุลิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสนอแนวทางการทำวิจัยและเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ดร.นันทพันธ์ นภัทรานันท์ ดร.ฐานันต์ศักดิ์ เทพญา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ หลีวิจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

เอกพจน์ วิเชียร ใจดี

สารบัญ

	หน้า
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(15)
สัญลักษณ์	(22)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	7
2.1 โครงสร้างและลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระและเจ็ทพุ่งชน	7
2.1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	7
2.1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ	8
2.1.3 กลไกการเกิดความปั่นป่วนในเจ็ทอิสระและเจ็ทพุ่งชน	11
2.2 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน	13
2.2.1 ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	13
2.2.2 ลักษณะของหัวฉีด	15
2.2.3 ความถี่ที่ใช้กระตุ้นการไหลของเจ็ท	16
2.3 โครงสร้างการไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน	17
2.4 การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง	18
2.4.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน	18
2.4.2 งานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทลำเดียวไหลแบบต่อเนื่อง	21
2.4.3 งานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทลำเดียวแบบไหลสั่นเป็นจังหวะ	22
2.4.4 งานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทกลุ่มแบบไหลต่อเนื่อง	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง	30
3.1 รายละเอียดของชุดทดลอง	30
3.2 กลไกการทำงานของระบบสร้างการไหลแบบสันเป็นจังหวะ	32
3.3 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการศึกษา	33
3.4 การวัดความเร็วและความถี่ของเจ็ท	34
3.4.1 รายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ศึกษา	34
3.4.2 การสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	36
3.5 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	37
3.5.1 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิวิดคริสตัล	38
3.5.2 ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	43
3.5.3 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	45
3.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film)	47
3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	48
บทที่ 4 การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	49
4.1 ทฤษฎีของการคำนวณพลศาสตร์ของไหล	49
4.1.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์	49
4.1.2 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	51
4.1.3 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model)	52
4.2 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล	56
4.3 ขั้นตอนการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	57
4.3.1 การสร้างกริด (Meshing)	57
4.3.2 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ (Boundary Condition)	58
4.3.3 การคำนวณ	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการศึกษา	62
5.1 ลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดียว	62
5.1.1 การกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทลำเดียว	62
5.1.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ได้จากการจำลองการไหล โดยใช้ CFD ของเจ็ทลำเดียว	67
5.1.3 ลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว	72
5.2 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชน	74
5.2.1 ผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อ การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีเจ็ทไหล แบบต่อเนื่อง	74
5.2.2 ผลของความถี่ของเจ็ทที่มีผลต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ บนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว	75
5.2.3 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวกรณีของเจ็ทลำเดียว	78
5.3 ลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน	80
5.3.1 การกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของกลุ่มเจ็ท	80
5.3.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ได้จากการจำลองการไหล โดยใช้ CFD ของกลุ่มเจ็ท	85
5.3.3 ลักษณะการไหลบนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ท	92
5.4 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	94
5.4.1 ผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อ การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ท	94
5.4.2 ผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน บนพื้นผิวที่กลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	96
5.4.3 ผลของความถี่ของเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ที่กลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	98
5.4.4 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวกรณีของกลุ่มเจ็ท	103

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	107
6.1 สรุปผลการทดลอง	107
6.2 ข้อเสนอแนะ	108
บรรณานุกรม	109
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน	112
ภาคผนวก ข ผลการศึกษากายถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	116
ภาคผนวก ค บทความสำหรับเผยแพร่	121
ประวัติผู้เขียน	131

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง	48
ตารางที่ 4.1 แสดงการกำหนดความเร็วในกรณีเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ	60
ตารางที่ 4.2 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization	61

รายการภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงการติดครีปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	2
รูปที่ 1.2 แสดงความหนาของชั้นขอบเขต	3
รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลของอากาศหลังปีกสร้างการบิน	3
รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	4
รูปที่ 1.5 แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของท่อเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง	6
รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว	7
รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายความเร็วและการกระจายความปั่นป่วนที่ปากทางออกหัวฉีด แต่ละแบบ	9
รูปที่ 2.3 ลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ	12
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	13
รูปที่ 2.6 การกระจายของนัสเซิลท์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ท ถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ และ $9.2D$ (กรณีที่ใช้หัวฉีดแบบท่อและ $Re=20,000$, Nu_{μ} : ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์สูงสุด ณ จุดศูนย์กลางของการพุ่งชน)	14
รูปที่ 2.7 แสดงหัวฉีดของเจ็ทแบบอริฟิส	15
รูปที่ 2.8 ลักษณะการไหลของเจ็ทแบบช่องสี่เหลี่ยม	16
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระแบบไหลต่อเนื่องและแบบไหลสั้นเป็นจิ้งหะ	17
รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลวนระหว่างลำเจ็ทของการไหลแบบกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน	18
รูปที่ 2.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชน	19
รูปที่ 2.12 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้	19
รูปที่ 2.13 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	20
รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ระบายความร้อนและโครงสร้างภายในอุโมงค์แบบสายพานลำเลียง	21
รูปที่ 2.15 แสดงเปรียบเทียบการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทพุ่งชน	21
รูปที่ 2.16 แสดงชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างการไหลของเจ็ทแบบสั้นเป็นจิ้งหะ	23
รูปที่ 2.17 แสดงผลของความถี่ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะห่างจาก ปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่าง ๆ ($Re=10,000$ และเปอร์เซ็นต์ ของแอมพลิจูดความเร็วเจ็ท $An=5\%$)	24

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.18 แสดงผลของแอมพลิจูดความเร็วเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่าง ๆ ($Re=10,000$ และ $f=41Hz$)	24
รูปที่ 2.19 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสร้างกระแสเจ็ทแบบจังหวะ	25
รูปที่ 2.20 แสดงการกระจายของความปั่นป่วนที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท ตำแหน่งต่าง ๆ	26
รูปที่ 2.21 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=34,000$)	26
รูปที่ 2.22 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน แบบไหลสั้นเป็นจังหวะ	27
รูปที่ 2.23 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะห่างจาก ปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ต่าง ๆ โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท	27
รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทและชุดทดลองการทดลองของ San และ Lai	28
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายชุดทดลองที่ใช้ในการทดลอง	31
รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลอง	32
รูปที่ 3.3 แสดงกลไกการควบคุมการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ	33
รูปที่ 3.4 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลอง	34
รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดความเร็วและความถี่ของเจ็ท	35
รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความเร็วที่สอบเทียบ	37
รูปที่ 3.7 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	38
รูปที่ 3.8 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิวคิวิตคริสตัล	39
รูปที่ 3.9 แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวคิวิตคริสตัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ	40
รูปที่ 3.10 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงเจดสีเทียบกับอุณหภูมิทั้ง 5 บริเวณที่สอบเทียบสี	42
รูปที่ 3.11 แสดงเส้นสมการที่ใช้ทำนายอุณหภูมิเทียบกับข้อมูลที่ได้จาก การสอบเทียบทั้ง 5 บริเวณ	42
รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างผลการหาการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ได้จาก การประมวลผลภาพด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	46
รูปที่ 3.13 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิว	47

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน	51
รูปที่ 4.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล	56
รูปที่ 4.3 แสดงรายละเอียดของการสร้างกริดในแบบจำลอง	57
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะกริดภายในของแบบจำลองการไหลบริเวณหน้าตัด A-A'	57
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของกริดใกล้บริเวณปากทางออกของเจ็ท	58
รูปที่ 4.6 การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของการไหล	59
รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทลำเดียวตามแนวแกน Y ($\bar{W}_0=12.1$ m/s, Re=12,000)	63
รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะความปั่นป่วนของเจ็ทลำเดียวที่กระจายตามแนวแกน Y ($\bar{W}_0=12.1$ m/s, Re=12,000)	64
รูปที่ 5.3 แสดงการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทลำเดียวตามแนวแกน Z ($\bar{W}_0=12.1$ m/s, Re=12,000)	65
รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทลำเดียวที่ปากทางออกเจ็ท ($Z \approx 0D$) ($\bar{W}_0=12.1$ m/s, Re=12,000)	66
รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ Y/D=0 กรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง (St=0, Re=12,000)	67
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่เงื่อนไข St=0.0074 ระยะ L=2D (Y/D=0, Re=12,000)	68
รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่เงื่อนไข St=0.0472 ระยะ L=2D (Y/D=0, Re=12,000)	68
รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่เงื่อนไข St=0.0074 ระยะ L=6D (Y/D=0, Re=12,000)	70
รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่เงื่อนไข St=0.0472 ระยะ L=6D (Y/D=0, Re=12,000)	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.10 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)	72
รูปที่ 5.11 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่ระยะ $L=2D$ ระยะเวลาหลังจากเจ็ทพุ่งชน 150 วินาที ($Re=12,000$)	73
รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($Re=12,000$)	74
รูปที่ 5.13 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง (จากเส้นประในรูปที่ 5.12, $Re=12,000$)	75
รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)	76
รูปที่ 5.15 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $L=2D$ (จากเส้นประในรูปที่ 5.14, $Re=12,000$)	76
รูปที่ 5.16 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนที่ระยะ $L=6D$ ($Re=12,000$)	77
รูปที่ 5.17 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $L=6D$ (จากเส้นประในรูปที่ 5.16, $Re=12,000$)	77
รูปที่ 5.18 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนที่อยู่ในช่วงรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ ($Re=12,000$)	78
รูปที่ 5.19 แสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนที่อยู่ในช่วงรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ ($Re=12,000$)	79
รูปที่ 5.20 การกระจายความเร็วของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ทตามแนวแกน Z ($\overline{W}_0=12.1$ m/s, $Re=12,000$)	80
รูปที่ 5.21 การกระจายความปั่นป่วนของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ทตามแนวแกน Z ($\overline{W}_0=12.1$ m/s, $Re=12,000$)	81
รูปที่ 5.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ทที่ระยะ $Z \approx 0D$, $S=2D$ ($\overline{W}_0=12.1$ m/s, $Re=12,000$)	82
รูปที่ 5.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ทที่ระยะ $Z \approx 0D$, $S=4D$ ($\overline{W}_0=12.1$ m/s, $Re=12,000$)	83

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ท ที่ระยะ $Z \approx 0D$, $S=6D$ ($\bar{W}_0=12.1$ m/s, $Re=12,000$)	84
รูปที่ 5.25 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)	86
รูปที่ 5.26 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)	86
รูปที่ 5.27 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)	87
รูปที่ 5.28 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $L=6D$ ($Re=12,000$)	87
รูปที่ 5.29 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0074$ ระยะ $S=2D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)	88
รูปที่ 5.30 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0074$ ระยะ $S=6D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)	89
รูปที่ 5.31 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0472$ ระยะ $S=2D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)	90
รูปที่ 5.32 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0472$ ระยะ $S=6D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)	91
รูปที่ 5.33 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่ระยะเวลาหลังจากพุ่งชน 150 วินาที ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)	93
รูปที่ 5.34 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิว พุ่งชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)	94

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.35 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิว พุงชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0472$) ที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)	94
รูปที่ 5.36 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิว พุงชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0074$) ที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)	94
รูปที่ 5.37 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิว พุงชนต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)	95
รูปที่ 5.38 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิว พุงชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0472$) ที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)	95
รูปที่ 5.39 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิว พุงชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0074$) ที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)	96
รูปที่ 5.40 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุงชน กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ($Re=12,000$)	97
รูปที่ 5.41 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุงชน กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบ เป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0472$ ($Re=12,000$)	97
รูปที่ 5.42 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุงชน กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบ เป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0074$ ($Re=12,000$)	98
รูปที่ 5.43 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุงชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=2D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)	99
รูปที่ 5.44 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลาง ที่กลุ่มเจ็ทพุงชน ที่สโตวฮาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S=2D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)	99
รูปที่ 5.45 แสดงการกระจายน้สเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุงชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=2D$, $L=6D$ ($Re=12,000$)	100

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.46 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลาง ที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่สโตวาหาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S=2D$, $L=6D$ ($Re=12,000$)	100
รูปที่ 5.47 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)	101
รูปที่ 5.48 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลาง ที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่สโตวาหาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S=6D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)	101
รูปที่ 5.49 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6D$, $L=6D$ ($Re=12,000$)	102
รูปที่ 5.50 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลาง ที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่สโตวาหาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S=6D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)	103
รูปที่ 5.51 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไข ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)	104
รูปที่ 5.52 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไข ระยะ $S=4D$ ($Re=12,000$)	104
รูปที่ 5.53 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไข ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)	104
รูปที่ 5.54 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเงื่อนไข ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)	105
รูปที่ 5.55 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเงื่อนไข ระยะ $S=4D$ ($Re=12,000$)	105
รูปที่ 5.56 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเงื่อนไข ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)	105

สัญลักษณ์และนิยาม

A	พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน [m^2]
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (Volumetric thermal expansion coefficient, [K^{-1}])
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท [m]
ϵ_{TLC}	ค่าการแผ่รังสีของแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล มีค่าเท่ากับ 0.9 [21]
f	ความถี่การสั่นของเจ็ท [Hz]
F	แรงภายนอกที่กระทำต่อมวล (External body force, [N])
g	แรงโน้มถ่วงของโลก [m/s^2]
G_k	อัตราการเกิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย
G_b	อัตราการเกิดความปั่นป่วนที่เกิดจากการลงค่า
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [$W/m^2 \cdot K$]
h_c	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ [$W/(m^2 \cdot K)$] [22]
I	กระแสไฟฟ้าแบบตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส [A]
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิ $25^\circ C$ [$W/(m^2 \cdot K)$]
k	พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, [$(kg \cdot m^2)/s^2$])
L	ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน
L	ค่าความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) ของพื้นผิว
L_{TLC}	ความยาวของแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลเท่ากับ 0.24 m
N	จำนวนข้อมูล
Nu	นัสเซิลต์นัมเบอร์ (Nusselt number)
Nu_L	นัสเซิลต์นัมเบอร์ที่สูญเสียบนแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล
\overline{Nu}	นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว
P	ความดันสถิต (Static pressure, [N/m^2])
Pr	แพลนดน์นัมเบอร์ (Prandtl number)
\dot{Q}	อัตราการพาความร้อน [W]
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number)

R	ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส [Ω]
Ra_L	เรย์ไลท์นัมเบอร์ (Rayleigh number)
S	ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทถึงลำเจ็ท
St	สโตรฮาล์นัมเบอร์ (Strouhal number)
S_m	มวลที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายของมวลหลักและแหล่งกำเนิดอื่น [27]
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน [K]
T_w	อุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมคิวิตคริสตัล [K]
$\overline{T_w}$	อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน [K]
T_j	อุณหภูมิของเจ็ท [K]
T_s	อุณหภูมิภายในห้อง [K]
T	คาบของเวลา [s^{-1}]
\bar{u}	ความเร็วเฉลี่ย (Time average velocity, [m/s])
u'	ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด ๆ (Velocity fluctuation, m/s)
$\overline{u^2}$	ความเครียดเฉลี่ยตั้งฉาก (Normal mean stress, N/m^2)
μ_t	ความหนืดแบบปั่นป่วน (Eddy viscosity, [kg/(m·s)])
μ	ความหนืดของโมเลกุล (Viscosity molecular, [kg/(m·s)])
ν	ความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity, [kg/(m·s)])
ν_t	ความเค้นเฉลี่ยของการไหล (Strain mean flow)
W_i	ความเร็วที่เกิดขึ้น ณ เวลาใด [m/s]
W_i'	ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด [m/s]
W_{rms}	ความเร็วเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด [m/s]
$\overline{W_j}$	ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่ปากทางออกของเจ็ท [m/s]
$\overline{W_0}$	ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทในแนวแกน Z [m/s]
W_{TLC}	ความกว้างของแผ่นเทอร์โมคิวิตคริสตัลเท่ากับ 0.24 m
Y_M	ผลการขยายความผันผวนของอัตราการสลายปั่นป่วน
σ	ค่า Stefan Boltzman เท่ากับ $5.670373 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
α	ความแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity, [m^2/s])

ε	อัตราการสลายแบบปั่นป่วน (Dissipation rate, [m ² /s ³])
σ_k	ความปั่นป่วนของเพลนที่นัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน
σ_ε	ความปั่นป่วนของเพลนที่นัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายปั่นป่วน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

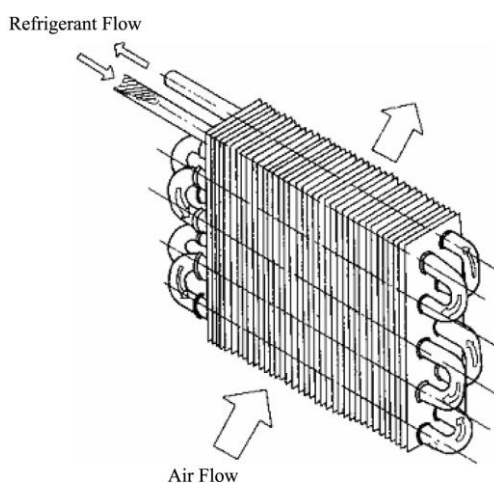
ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีปริมาณการใช้พลังงานที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่แหล่งพลังงานจากน้ำมัน เชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติที่มีในปัจจุบันกลับมีจำกัดไม่เพียงพอต่อการใช้งานในอนาคต จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงานเพื่อช่วยในการประหยัดการใช้พลังงาน เช่น การลดสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการในอุตสาหกรรม การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางความร้อน และการนำความร้อนที่ปลดปล่อยทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งในกระบวนการหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรม สามารถใช้หลักการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและช่วยประหยัดพลังงานได้ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิต หรือการออกแบบอุปกรณ์ที่นำความร้อนของแก๊สร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งให้สูญเสียเปล่า นำกลับมาแลกเปลี่ยนกับของไหลในกระบวนการเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของของไหลให้สูงขึ้นก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตสามารถลดการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมได้ เป็นต้น

ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวข้างต้นเป็นกระบวนการของการให้ความร้อน หรือการระบายความร้อน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

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

โดยที่ \dot{Q}	คือ อัตราการพาความร้อน [W]
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน [m^2]
ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน [K]

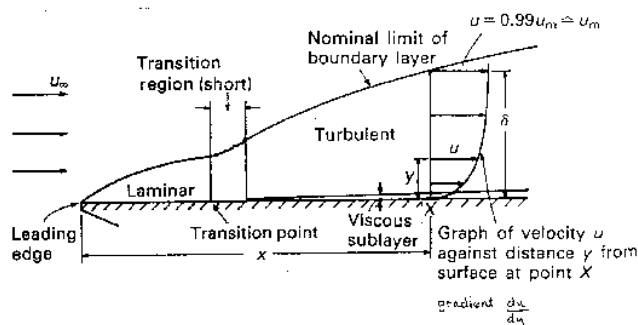
จากสมการที่ (1.1) การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่งคือการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การติดกลุ่มของครีบ (Fins) บนผิวแลกเปลี่ยนความร้อน รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะอุปกรณ์ทำความเย็นที่ใช้ในระบบปรับอากาศ ในรูปสารทำความเย็น (Refrigerant) จะไหลผ่านท่อขนาดเล็กที่ขดไปขดมา โดยที่รอบท่อนี้ติดตั้งชุดของแผ่นครีบหลายแผ่น เมื่ออากาศที่มีอุณหภูมิสูงไหลผ่านแผ่นครีบเหล่านี้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับสารทำความเย็นที่อยู่ในท่อ ทำให้อากาศลดอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการเพิ่มแผ่นครีบช่วยเพิ่มอัตราการพาความร้อนระหว่างแผ่นครีบกับอากาศที่ไหลผ่านให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การติดครีบให้กับอุปกรณ์จะเป็นการเพิ่มขนาดและน้ำหนักให้แก่อุปกรณ์ และจำเป็นต้องคำนึงถึงการสูญเสียความดันในระบบการไหลของอากาศด้วย



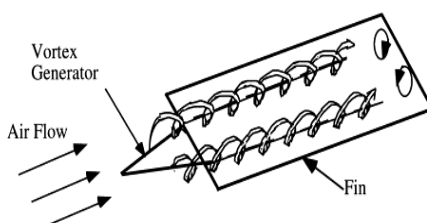
รูปที่ 1.1 แสดงการติดครีบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [1]

วิธีที่สองคือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ทำได้โดยลดความหนาหรือทำลายชั้นขอบเขต (Boundary layer) ของการไหลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนปรกติ ชั้นขอบเขตเกิดจากผลของความหนืดของไหลมีผลทำให้บริเวณใกล้พื้นผิวมีความเร็วลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งชั้นขอบเขตนี้มีความเร็วต่ำและในกรณีที่ของไหลมีสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ เช่น น้ำหรืออากาศ ชั้นขอบเขตจึงเปรียบเสมือนฉนวนความร้อนที่ติดบนพื้นผิวทำให้การแลกเปลี่ยนระหว่างของไหลกับพื้นผิวลดต่ำลง ดังนั้นการลดความหนาหรือทำลายชั้นขอบเขตจึงสามารถเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ดีขึ้น สำหรับวิธีการที่จะลดความหนาหรือทำลายชั้นขอบเขตการไหลนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น การเพิ่มความเร็วของการไหลให้

สูงขึ้นทำให้ความหนาของชั้นขอบเขตลดลง การตีปีกเพื่อสร้างกระแสหมุนวนเข้าไปทำลายชั้นขอบเขตของพื้นผิวดังรูปที่ 1.3 เป็นต้น

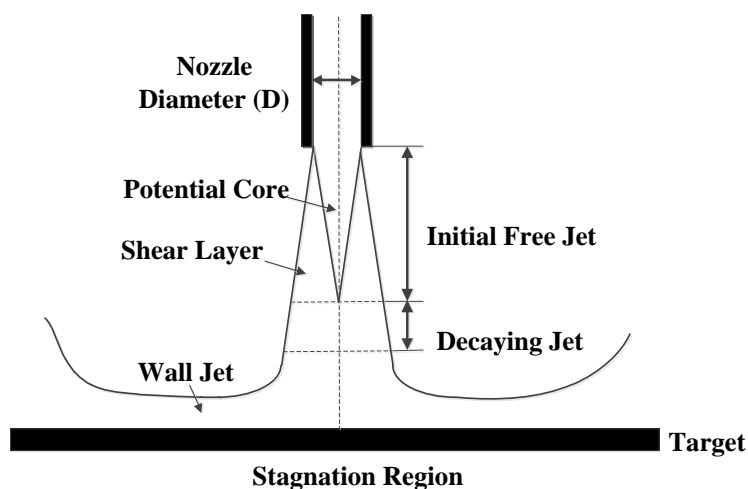


รูปที่ 1.2 แสดงความหนาของชั้นขอบเขต [2]



รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลของอากาศหลังปีกสร้างความเป็นปั่น [3]

การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (Impinging jet) เป็นวิธีใช้หัวฉีดส่งของไหลที่มีความเร็วสูงบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง เป็นอีกวิธีที่ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็วบนพื้นผิว เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทไหลพุ่งชนโดยตรง แต่อย่างไรก็ตามบริเวณรอบ ๆ ที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ เกิดจากชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิวมีความหนาเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงที่ผ่านมาจึงมีกลุ่มนักวิจัยได้คิดวิธีการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างของเจ็ท เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวให้สูงขึ้น เช่น การติดแผ่นบิดเข้าไปในท่อเจ็ทเพื่อสร้างเจ็ทที่มีการหมุนควงที่รบกวนการไหลของชั้นขอบเขตบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน [4] หรือการติดตั้งตัววางการไหลบริเวณปากทางออกของเจ็ท [4] เพื่อเพิ่มระดับความปั่นป่วนของการไหลในเจ็ทก่อนไหลพุ่งชนพื้นผิว เป็นต้น



รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน [5]

การควบคุมการไหลโดยการสร้างการไหลเจ็ทแบบสั่น (Pulsating jet) เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วในเจ็ทอย่างรวดเร็ว เป็นอีกวิธีที่ช่วยเพิ่มระดับความปั่นป่วนให้แก่การไหลของเจ็ท และรบกวนการเกิดชั้นขอบเขตบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในการนำเจ็ทพุ่งชนไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมอาจมีกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีบริเวณกว้าง จำเป็นต้องใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนแทนเจ็ทลำเดียว ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบไหลสั่นเป็นจังหวะส่วนใหญ่ได้ศึกษาเฉพาะกรณีของเจ็ทลำเดียว [6] ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในกรณีใช้แบบกลุ่มเจ็ท ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทแบบสั่นเป็นจังหวะพุ่งชนพื้นผิว และศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กลุ่มเจ็ทแบบสั่นพุ่งชน โดยจะเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เงื่อนไขความถี่การสั่นของเจ็ทต่าง ๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาผลของความถี่การสั่นของเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีของเจ็ทลำเดียวและกรณีของกลุ่มเจ็ท
- (2) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทแบบไหลสั่นเป็นจังหวะและกลไกการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทแบบไหลสั่นเป็นจังหวะพุ่งชน

(3) ศึกษาผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของความถี่ของการไหลแบบสั้นที่มีผลต่อพฤติกรรม การไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทแบบสั้นพุ่งชน และได้แนวทางในการเพิ่ม การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

(2) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบหรืออุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนหรือ ระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยการเพิ่มความสามารรถถ่ายเทความร้อนและความ สม่าเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เช่น การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนใน อุตสาหกรรมผลิตแผ่นโลหะการอบแห้งอาหารหรือการแช่เย็นในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

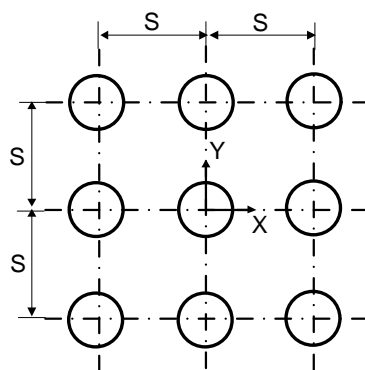
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

(1) ศึกษากรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องและเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะพุ่งชนตั้ง ฉากกับพื้นผิว

(2) ศึกษาผลของระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D, 8D$ โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท มีขนาดเท่ากับ 16 mm

(3) ศึกษาผลของความถี่การสั้นของเจ็ท $f=0 \text{ Hz}, 4.5 \text{ Hz}, 9.25 \text{ Hz}, 19 \text{ Hz}, 28.5 \text{ Hz}$ (สโตวาฮาล์นัมเบอร์ $St=0, 0.0074, 0.0152, 0.0312, 0.0472$) ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=12,000$

(4) ศึกษากรณีเจ็ทลำเดี่ยวและกรณีกลุ่มเจ็ท 9 ลำที่เรียงเป็นแบบแถวเดียวกัน แถว ละ 3 ลำ จำนวน 3 แถว ดังแสดงในรูปที่ 1.5 โดยศึกษาผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทที่ $S = 2D, 4D, 6D$



รูปที่ 1.5 แสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวของท่อเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง

(5) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัล

(Thermo Liquid Crystal)

(6) ศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้วิธีฟิล์มน้ำมัน (Oil film)

(7) ศึกษาลักษณะการไหลโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

(ANSYS Ver.13.0, Fluent)

บทที่ 2

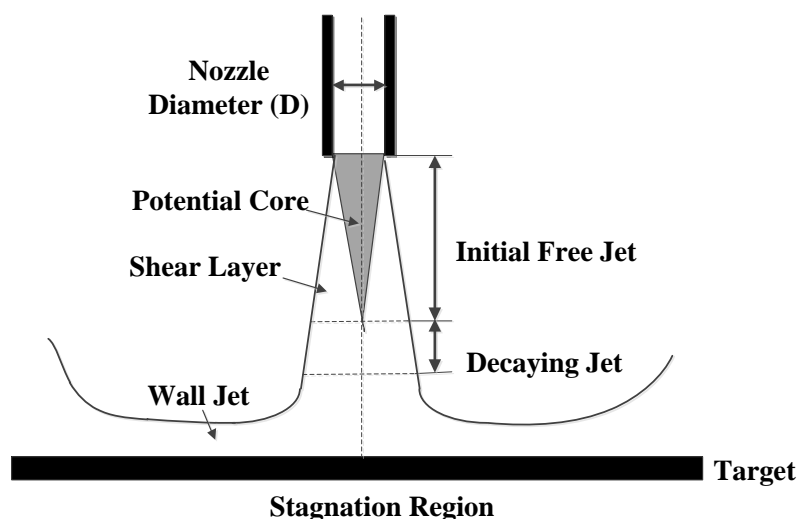
ทฤษฎีและหลักการ

ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของเจ็ทที่ออกมาจากหัวฉีด ในกรณีที่ต้องการควบคุมอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจำเป็นต้องควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ท ซึ่งในการควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ทนั้นจะต้องศึกษาให้เข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อน สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระและเจ็ทพุ่งชน ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน งานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทลำเดียวทั้งไหลแบบต่อเนื่องและแบบไหลสั้น และงานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทกลุ่มแบบไหลต่อเนื่อง

2.1 โครงสร้างและลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระและเจ็ทพุ่งชน

2.1.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือ ของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างการไหลกรณีเจ็ทพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนสามารถ แบ่งได้ 3 ส่วนดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว [5]

(1) บริเวณเจ็ทอิสระ (Free jet region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีด ซึ่งจะมีบริเวณที่ใกล้เคียงกับความเร็วที่ทางออกของเจ็ทหรือโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) อยู่กึ่งกลาง โดยที่ความยาวของโพเทนเชียลคอร์ขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยลักษณะทั่วไปส่วนที่เป็นเจ็ทอิสระของเจ็ทพุ่งชนจะเหมือนกับลักษณะทั่วไปของโครงสร้างการไหลเจ็ทอิสระ [5]

(2) บริเวณเจ็ทพุ่งชน (Jet impingement region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิว โดยตรงและบริเวณรอบ ๆ ซึ่งก่อนเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวความเร็วของเจ็ทเริ่มลดลงหรือเกิดการสลายตัวของเจ็ท (Decaying jet) และมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนพื้นผิวล้อมรอบรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของการไหลรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลจากแนวแกนเป็นแนวรัศมีอย่างกะทันหันหลังจากการชนพื้นผิว

(3) บริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นการไหลของเจ็ทในแนวขนานบนพื้นผิวรอบ ๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนหลังจากการชนในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทที่ไหลบนพื้นผิวจะเริ่มลดลง โดยที่อัตราการลดความเร็วจะแปรผกผันจากระยะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีซึ่งส่งผลให้ชั้นขอบเขต (Boundary layer) บนพื้นผิวจะค่อย ๆ หนาขึ้น

2.1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

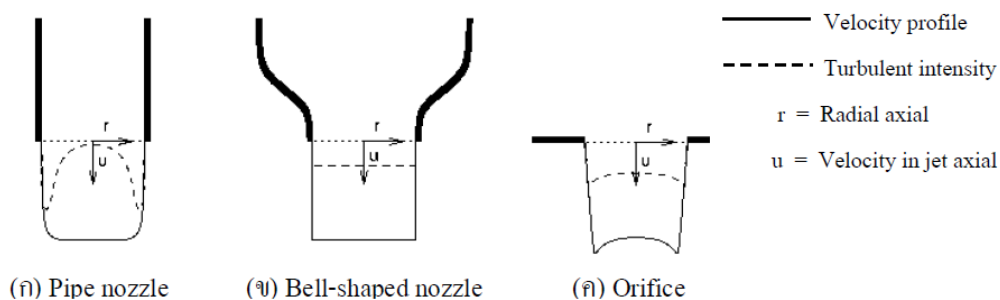
ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนที่ไหลออกจากหัวฉีด รูปทรงของหัวฉีดจะมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติการไหลของเจ็ทสองประการ คือ ลักษณะการกระจายความเร็ว (Velocity profile) และความปั่นป่วน (Turbulence profiles) ซึ่งคุณสมบัติการไหลของเจ็ททั้งสองประการมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว คือ เจ็ทพุ่งชนที่มีความเร็วและระดับความปั่นป่วนที่สูงจะมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงตามไปด้วย จากรูปที่ 2.2 แสดงการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่ตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีด 3 แบบที่นิยมใช้ทั่วไป

กรณีหัวฉีดแบบท่อ (Pipe nozzle) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากท่อยาวที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่การกระจายความเร็วที่ปากทางออกจะมีลักษณะเหมือนกับการกระจายความเร็วของการไหลในท่อดังแสดงในรูป 2.2 (ก) ส่วนการกระจายความปั่นป่วนจะต่ำบริเวณกึ่งกลางท่อและจะสูงบริเวณใกล้ขอบท่อ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของพื้นผิวท่อ

กรณีหัวฉีดแบบระฆัง (Bell-shaped nozzle) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากหัวฉีดที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดก่อนเจ็ทไหลออกจากปากทางออกจึงมีผลทำให้

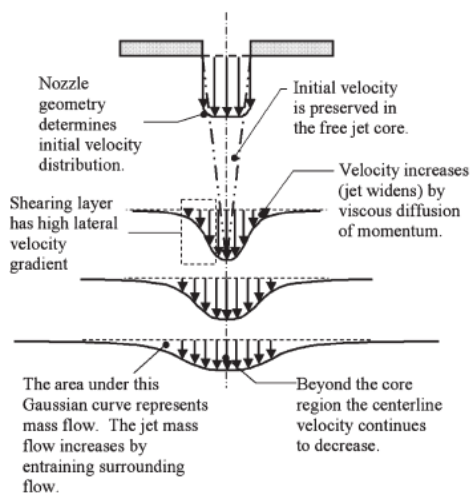
การกระจายความเร็วที่ปากทางออกก่อนข้างที่จะสม่ำเสมอและระดับความปั่นป่วนที่ปากทางออกเจ็ทก่อนข้างต่ำและกระจายสม่ำเสมอตามที่แสดงในรูป 2.2(ข)

กรณีหัวฉีดแบบออริฟิส (Orifice) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากรูเจ็ทที่เจาะบนแผ่นบางบริเวณใกล้ขอบที่ปากทางออกเจ็ทจะมีความเร็วของเจ็ทสูงกว่าบริเวณกึ่งกลางเจ็ทเล็กน้อยและการไหลของเจ็ทจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นในบริเวณใกล้ปากทางออกเนื่องจากที่ปากทางออกจะเกิดปรากฏการณ์ Vena contracta ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเจ็ทที่ออกจากปากทางออกลดลงระดับความปั่นป่วนที่ปากทางออกของหัวฉีดแบบออริฟิสก่อนข้างสูงและสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับหัวฉีดแบบอื่นตามที่แสดงในรูป 2.2(ค)



รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายความเร็วและการกระจายความปั่นป่วนที่ปากทางออกหัวฉีดแต่ละแบบ

เมื่อเจ็ทไหลออกมาห่างจากปากทางออกของหัวฉีด ความแตกต่างของความเร็วเจ็ทและบริเวณรอบการไหลของเจ็ท ทำให้เกิดความเค้นเฉือนระหว่างของไหลบริเวณรอบข้างกับเจ็ท ซึ่งบริเวณนี้เรียกว่า ชั้นของการเฉือน (Shearing layer) ที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทเพิ่มขึ้น การกระจายความเร็วเจ็ทจะขยายออกตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วบนแกนเจ็ทและความเร็วบริเวณรอบเจ็ทจะลดลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องจากเกิดการถ่ายโอนโมเมนตัมและมวลของของไหลระหว่างรอบเจ็ทกับลำเจ็ท จึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในลำเจ็ทในส่วนของโพเทนเชียลคอร์ ซึ่งมีความดันรวมสูงก็ได้รับผลกระทบจากการถ่ายโอนโมเมนตัมและมีผลทำให้ความเร็วและความดันลดลงตามลำดับ กรณีเจ็ทไหลปะทะพื้นผิวการถ่ายโอนโมเมนตัมและมวลของของไหลระหว่างรอบเจ็ทกับลำเจ็ทจะไม่เกิดขึ้น ถ้าระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวน้อยกว่าสองเท่าของขนาดปากทางออกของหัวฉีด เพราะหัวฉีดอยู่ใกล้พื้นผิวมากจนไม่เกิดบริเวณของเจ็ทอิสระ จึงทำให้ความดันสถิตยเพิ่มขึ้นบริเวณพุ่งชนสำหรับความดันนี้ได้รับอิทธิพลต่อการไหลทันทีที่ออกจากหัวฉีด



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ [5]

เมื่อชั้นของการเจือปนขยายไปยังศูนย์กลางของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว จะทำให้โพเทนเชียลคอร์ค่อย ๆ สลายตัวไป จุดสิ้นสุดของโพเทนเชียลคอร์ถูกกำหนดบนตำแหน่งแกนของเจ็ทจากจุดเริ่มต้นการสลายของโพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทอยู่ในช่วง 4D-8D [5] ในช่วงการสลายของโพเทนเชียลคอร์ความเร็วแกนของเจ็ทจะค่อย ๆ ลดลงและการกระจายความเร็วของเจ็ทตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้นการลดลงของความเร็วเจ็ทจากจุดศูนย์กลางออกมาตามแนวรัศมีมีลักษณะคล้ายเส้นโค้ง Gaussian ที่มีลักษณะกว้างและมีความเร็วลดลงตามระยะห่างจากปากทางออกของหัวฉีดความเร็วแกนของเจ็ทและการขยายตัวของเจ็ทจะแปรผันเชิงเส้นตรงกับตำแหน่งระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ท Martin [7] ให้สมการทำนายความเร็วของเจ็ทอิสระ และการสลายตัวของโพเทนเชียลคอร์ของการไหลของเจ็ทในช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ต่ำ Viskanta [8] ได้แบ่งบริเวณของเจ็ทอิสระเป็น 2 ส่วน คือ บริเวณกำลังพัฒนา (Develop zone) และบริเวณที่พัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully developed zone) เป็นบริเวณที่เริ่มการสลายของลำเจ็ทและขยายความเร็วของเจ็ทออกตามแนวรัศมีแบบเส้นโค้ง Gaussian ในกรณีของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว คือ การไหลความเร็วในแนวแกนของเจ็ทเริ่มลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์และเปลี่ยนแกนความเร็วของเจ็ทไปในแนวขนานกับผนังพุ่งชน ซึ่งบริเวณนี้เรียกว่า บริเวณเจ็ทพุ่งชน (Jet impingement region) โดยก่อนการพุ่งชนพื้นผิว เจ็ทมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนมีความเครียดตึงจากและความเค้นเฉือนของการไหลสูงมีผลทำให้เกิดกระแสหมุนวนและความปั่นป่วนเพิ่มมากขึ้น การไหลในลักษณะนี้จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการถ่ายโอนความร้อนและมวลสาร ซึ่งบริเวณเจ็ทพุ่งชนมีขนาดเป็น 1.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ [7] Maurel และ Soliec [9] พบว่าบริเวณเจ็ทพุ่งชนนี้มีความสัมพันธ์ของความเร็วตั้งฉากและความเร็วขนานเป็นลบ ($u'v' < 0$) และในกรณีของเจ็ทแบบสล็อตจะมีความยาวของบริเวณเจ็ทพุ่งชน

เท่ากับ 13% ของความสูงของหัวฉีด โดยขนาดของบริเวณเจ็ทพุ่งชนไม่ขึ้นกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

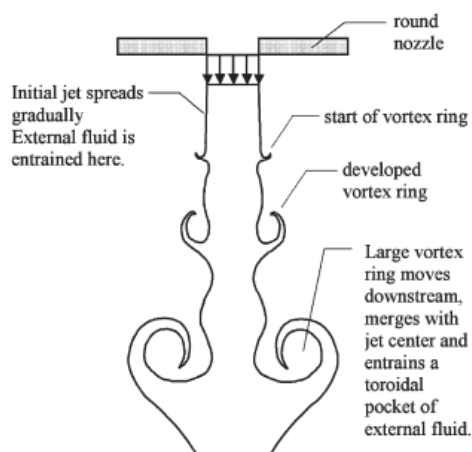
หลังจากการพุ่งชนมีการเปลี่ยนแกนของความเร็วจากแนวตั้งฉากกับพื้นผิวพุ่งชนเป็นความเร็วตามแนวขนานกับพื้นผิวพุ่งชนเรียกว่า บริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet region) บริเวณเจ็ทผนังจะมีความหนาของชั้นขอบเขตน้อยที่สุดอยู่ในช่วง 0.75-3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนและหนาเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากจุดพุ่งชนเพิ่มมากขึ้น ความหนาที่วัดจากความสูงของของไหลที่ไหลขนานกับผนัง โดยแปรผกผันกับความเร็วเจ็ทที่ลดลงและความเร็วเจ็ทสูงสุดในช่วงบริเวณเจ็ทผนังต่อตำแหน่งระยะห่างจากจุดที่พุ่งชนพื้นผิวแปรผันตรงกับความหนาของชั้นขอบเขตและชั้นขอบเขตภายในบริเวณเจ็ทผนังจากจุดพุ่งชนจะมีความหนาไม่เกิน 1% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ท [7] บริเวณเจ็ทผนังมีชั้นของการเชื่อมกับของไหลเหนือผนัง ซึ่งมีอิทธิพลต่อความแตกต่างความเร็วของการไหลที่จุดพุ่งชนและการไหลมีผลต่อความเร็วบริเวณเจ็ทผนัง ทำให้ความเร็วเจ็ทผนังลดลง

2.1.3 กลไกการเกิดความปั่นป่วนในเจ็ทอิสระและเจ็ทพุ่งชน

พฤติกรรมของการไหลของเจ็ทสามารถแบ่งประเภทการไหลโดยใช้เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ กล่าวคือที่ $Re < 1,000$ การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่ $Re > 3,000$ การไหลเจ็ทเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และที่ $1,000 < Re < 3,000$ การไหลอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนผ่าน (Transition flow) [8] ซึ่งความปั่นป่วนของเจ็ทจะมีผลเป็นอย่างมากกับอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน คือ การไหลแบบราบเรียบจะมีการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าการไหลแบบปั่นป่วน จึงมีการใช้งานเจ็ทแบบไหลปั่นป่วนส่วนมากในอุตสาหกรรม

ที่บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ทถือเป็นต้นกำเนิดของความปั่นป่วนของลำเจ็ท คือ การไหลเกิดการเชื่อมกันบริเวณรอบของลำเจ็ทกับของไหลรอบเจ็ท โดยชั้นของการเชื่อม (Shear layer) เริ่มจากชั้นบาง ๆ รอบของลำเจ็ทและจะหนาขึ้นตามระยะห่างในแนวแกนของเจ็ท ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูงชั้นของการเชื่อมจะสร้างการไหลที่ไม่แน่นอนตามทฤษฎีความไม่แน่นอนของ Kelvin-Helmholtz ดังรูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ไม่แน่นอนของเจ็ทอิสระ (Free jet) ที่ความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน ($Re > 1,000$) ผลจากความไม่แน่นอนของแรงเฉือนเอาชนะการแพร่ของโมเมนตัมและความหนืดของของไหลที่มีเสถียรภาพ ซึ่งทำให้ที่ตำแหน่งชั้นของการเชื่อมและลักษณะการไหลเกิดการแกว่งไปมา ห่างออกไปที่การไหลบริเวณปลายทางการไหลของเจ็ท ขนาดและพื้นที่ของการแกว่งเพิ่มมากขึ้นจนเปลี่ยนรูปกลายเป็นกระแสมุขวนขนาดใหญ่ (Large-scale eddies) บริเวณรอบของเจ็ท กระแสมุขวนขนาดใหญ่ที่สุดจะมีขนาด

เท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหัวฉีดเจ็ท และซึ่งสุดท้ายจะแตกแยกออกกลายเป็นกระแสมหุมนวนขนาดเล็กไปในที่สุด



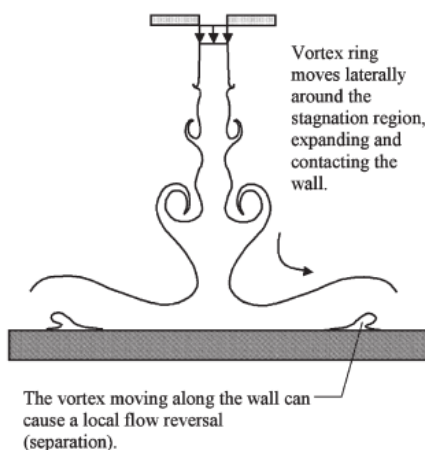
รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ [5]

ในช่วงที่ความเร็วตามแนวแกนของเจ็ทลดลง ชั้นของการเฉือนจะขยายตัวออกมาจากแนวแกนของเจ็ทเพิ่มมากขึ้น ชั้นของการเฉือนนี้จะมีผลต่อการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหล แต่เป็นจากการหุมนวนขนาดเล็ก และจะเพิ่มกลไกที่มีอิทธิพลต่อความปั่นป่วนของสนามการไหล มีอิทธิพลต่อชั้นของการเฉือนเพิ่มมากขึ้นจนทำให้เกิดการหุมนวนใหญ่ขึ้น การลดความเร็วของการไหลของเจ็ทในช่วงนี้จะสร้างความเค้นตึงฉากและความเครียดตึงฉาก ซึ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วน ดังโมเดลการคำนวณเชิงตัวเลขที่เสนอโดย Abe และ Suga [10] ซึ่งแสดงให้เห็นการถ่ายโอนความร้อนและมวลที่สูงขึ้นในพื้นที่บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งเกิดกระแสมหุมนวนขนาดใหญ่ แต่ในทางตรงกันข้ามเจ็ทผนังที่กำลังพัฒนาจะถูกความเค้นเฉือนนี้ทำลาย

นอกจากนี้ การไหลของเจ็ทไปตามผนังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความปั่นป่วนบริเวณเจ็ทผนัง โดยเริ่มต้นจากการไหลแบบราบเรียบในชั้นขอบเขตจนกระทั่งกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วนบนผนังที่อยู่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางของการพุ่งชนในกรณีของเจ็ทที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความปั่นป่วนหรือการไหลแบบปั่นป่วน การไหลลักษณะนี้จะเกิดความปั่นป่วนมากบริเวณใกล้ผนังและการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะมีความปั่นป่วนของความเร็วที่ตั้งฉากกับผนังมาก คือ ความปั่นป่วนของเจ็ทบริเวณก่อนพุ่งชนผนัง ทำให้ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณนี้มีความแตกต่างที่ชัดเจนมากกว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณเจ็ทผนัง [11] โครงสร้างของความปั่นป่วนขนาดใหญ่ของการไหลในเจ็ทอิสระมีผลเป็นอย่างมากต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเท

ความร้อนระหว่างบริเวณเจ็ทพุ่งชนและบริเวณเจ็ทผนัง รูปแบบของการหมุนวนในชั้นของการเลื่อนของเจ็ทอิสระที่เป็นการหมุนวนหลัก สามารถทะลุทะลวงชั้นขอบเขตและแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์และอุณหภูมิของของไหล ซึ่งการหมุนวนนี้จะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วย

สนามการไหลแบบปั่นป่วนตามบริเวณเจ็ทผนังเป็นต้นเหตุของการเกิดกระแสหมุนวนรองบนผนัง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความปั่นป่วนในแนวรัศมีของความเร็วของเจ็ทและการเปลี่ยนแปลงของความดันจะสร้างการไหลย้อนกลับบนผนัง ทำให้เกิดกระแสหมุนวนรองดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งกระแสหมุนวนรองที่เกิดขึ้นทำให้ความสามารถการถ่ายเทความร้อนและมวลสารบริเวณนี้เพิ่มขึ้น แต่บริเวณหลังจากเกิดกระแสหมุนวนรองเกิดการสูญเสียของพลังงานจลน์ จึงทำให้ปลายทางของการไหลมีความสามารถการถ่ายเทความร้อนต่ำลง



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน [5]

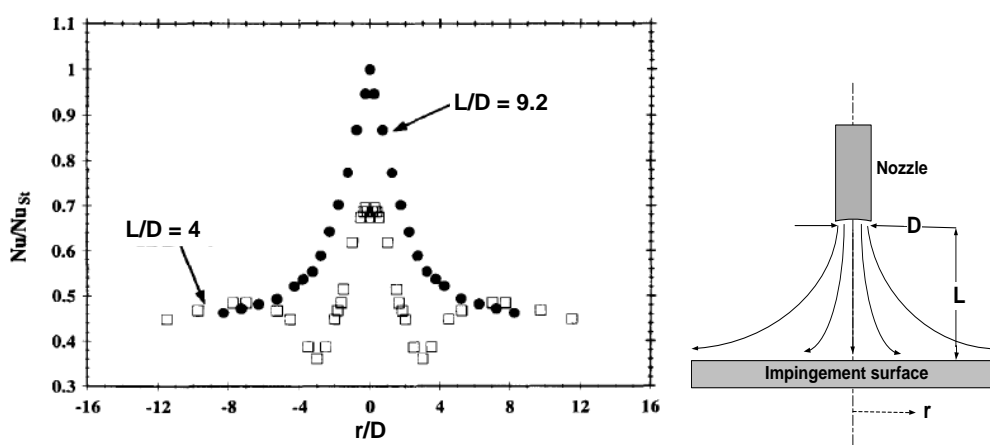
2.2 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ได้แก่ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ชนิดของหัวฉีดเจ็ท และความถี่การสั่นของเจ็ท ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิว เป็นต้น

2.2.1 ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

โดยทั่วไปบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง โดยเฉพาะที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เมื่อเทียบกับพื้นผิวบริเวณรอบ ๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนนี้จะขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่

จะพุ่งชนพื้นผิวในกรณีที่ส่วนปลายสุดของโพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงที่สุด เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีโมเมนตัมและมีความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่สูง แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะลดลง เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง [10, 12, 13 และ 14]



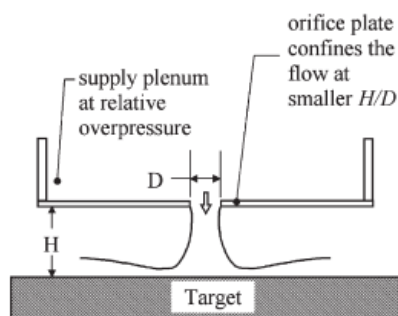
รูปที่ 2.6 การกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ และ $9.2D$ (กรณีที่ใช้หัวฉีดแบบท่อและ $Re=20,000$, Nu_s : ค่านัสเซลต์นัมเบอร์สูงสุด ณ จุดศูนย์กลางของการพุ่งชน) [15]

รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทลำเดียวที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวเรียบโดยใช้หัวฉีดแบบท่อ (Pipe nozzle) ในรูปแสดงผลกระทบของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ที่มีต่อการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์ตามแกนรัศมีของเจ็ท (r) ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทเท่ากับ 20,000 จากรูปที่ 2.6 พบว่ากรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์สูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ($r/D=0$) และจะค่อย ๆ ลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้นและที่ตำแหน่ง $r=3D$ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์มีค่าต่ำที่สุดและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่ง $r=7D$ จะเกิดนัสเซลต์นัมเบอร์สูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak heat transfer) หลังจากนั้นนัสเซลต์นัมเบอร์จะลดลงอย่างต่อเนื่องอีกครั้ง ส่วนสาเหตุของการเกิดนัสเซลต์นัมเบอร์สูงสุดอันดับที่สอง เกิดจากการที่เจ็ทผนังเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น [12] แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=9.2D$ จากรูปที่ 2.6 พบว่า นัสเซลต์นัมเบอร์ของแต่ละระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ($r/D = 0$) และ

หลังจากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวรัศมี และน้สเชลด์น้บเบอร์ที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าสูงกว่ากรณีระยะปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ ส่วนสาเหตุเกิดจากการที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=9.2D$ โครงสร้างของเจ็ทที่พุ่งชนคือมีระดับความปั่นป่วนที่สูง

2.2.2 ลักษณะของหัวฉีด

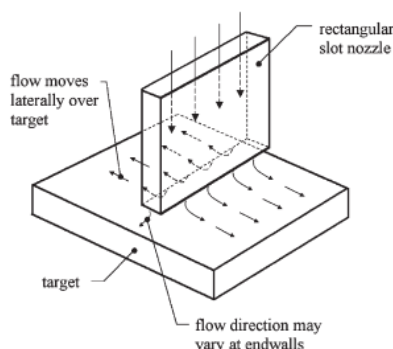
ลักษณะของการไหลและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระรวมถึงการถ่ายโอนความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน ส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลจากรูปแบบของหัวฉีดที่สร้างเจ็ทพุ่งชน เช่น หัวฉีดแบบท่อ (Pipe nozzle), หัวฉีดแบบช่องสี่เหลี่ยม (Slot nozzle) และหัวฉีดแบบแผ่นออริฟิส (Orifice nozzle) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงหัวฉีดของเจ็ทแบบออริฟิส [5]

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของหัวฉีดเจ็ทแบบออริฟิส โดยกล่องลม (Plenum) ทางต้นทางการไหลมีหน้าที่หน่วงการสั้นของความดัน และรักษาความสม่ำเสมอของความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ท การทดลองโดย Lee และ Lee [16] แสดงให้เห็นว่าหัวฉีดแบบออริฟิสสร้างการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนได้สูงกว่าการไหลที่พัฒนาเต็มที่จากหัวฉีดแบบท่อ โดยทุกตำแหน่งบนพื้นผิวเจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีที่ระยะพุ่งชน $L/D=2$ ค่าน้สเชลด์น้บเบอร์เพิ่มขึ้น 65% และที่ระยะ $L/D=10$ ค่าน้สเชลด์น้บเบอร์เพิ่มขึ้น 30% เมื่อเทียบกับหัวฉีดแบบท่อ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของหัวฉีดมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของหัวฉีดแบบช่องสี่เหลี่ยม ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าหัวฉีดแบบท่อและแบบออริฟิสเมื่อต้องการถ่ายเทความร้อนที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ แต่มีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับหัวฉีดแบบกลุ่มท่อ การใช้หัวฉีดแบบกลุ่มท่อสามารถควบคุมการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนได้มากกว่าทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติ

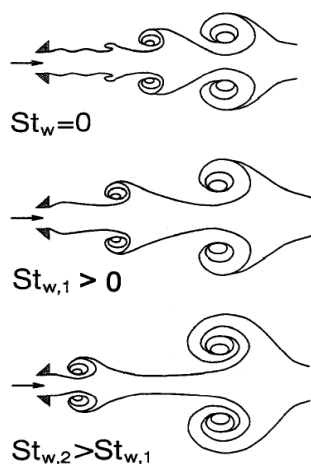


รูปที่ 2.8 ลักษณะการไหลของเจ็ทแบบช่องสี่เหลี่ยม [5]

2.2.3 ความถี่ที่ใช้กระตุ้นการไหลของเจ็ท

ของไหลที่ไหลออกจากปากทางออกของหัวฉีดมีลักษณะเป็นลำ โดยที่แกนกลางของเจ็ทจะมีความเร็วสูงสุดเมื่อห่างจากแกนกลางของเจ็ทในแนวรัศมี ความเร็วจะลดลงอย่างต่อเนื่องและที่ตำแหน่งห่างออกจากปากทางออกของเจ็ท ความเร็วในแนวแกนของเจ็ทก็จะลดลงทำให้เจ็ทที่พุ่งออกมาบริเวณของเจ็ทอิสระเกิดการเหวี่ยงและผสมเข้ากับของไหลรอบ ๆ ทำให้เกิดกระแสหมุนวนขึ้นมาหรือที่เรียกว่า เอ็ดดี้ (Eddy) รอบลำเจ็ท

เมื่อมีการควบคุมความถี่การไหลออกจากท่อเจ็ท ทำให้เกิดการไหลของเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ มีผลทำให้เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทกับของไหลรอบ ๆ รุนแรงขึ้นกว่ากรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง เนื่องจากการไหลสั้นเป็นจังหวะ ความเร็วของเจ็ทจะลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ไหลออกจากปากหัวฉีด ผลต่างของความเร็วที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจึงมีผลทำให้ลำเจ็ทขยายตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้กระแสหมุนวนเกิดขึ้นเร็วกว่าปกติและมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระแบบไหลต่อเนื่องและแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ [17]

ลักษณะการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ สามารถแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า สโตรฮาล์นัมเบอร์ (Strouhal number, St) เป็นนิยามของอัตราส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อยที่เกิดจากการไหลแบบไม่คงตัวที่มีอัตราเร่งเฉพาะจุด (Local acceleration) ต่อแรงเนื่องจากความเฉื่อยที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากจุดหนึ่งในสนามการไหล (Convective acceleration) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

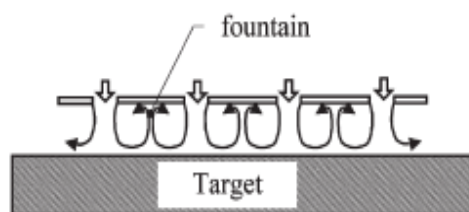
$$St = \frac{fD}{\bar{V}} \quad (2.1)$$

โดยที่ f คือ ความถี่การสั่นของเจ็ท [Hz]
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด [m]
 \bar{V} คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่ปากทางออกหัวฉีด [m/s]

2.3 โครงสร้างการไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน

โดยปรกติเจ็ทลำเดียวมักจะถูกนำไปใช้ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดเล็กหรือต้องการการถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว แต่ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีบริเวณกว้างจำเป็นต้องใช้กลุ่มของเจ็ทพุ่งชน (Multiple impinging jets) แทน เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงและสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว ซึ่งโครงสร้างการไหลของกลุ่มเจ็ทจะซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทลำเดียว โดยเฉพาะในกลุ่มของเจ็ทจะมีตัวแปรที่เพิ่มเข้ามา เช่น รูปแบบการจัดเรียงตัวของเจ็ทและระยะห่างระหว่างลำเจ็ท ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.10 หลังจากเจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวแล้วจะเกิดการปะทะกัน

ของเจ็ทผนังบนพื้นผิวและเกิดการไหลขึ้นจากผนังแล้วแยกการไหลและม้วนกลับมาพบกับลำเจ็ทอีกครั้ง



รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลวนระหว่างลำเจ็ทของการไหลแบบกลุ่มของเจ็ทพุ่งชน [13]

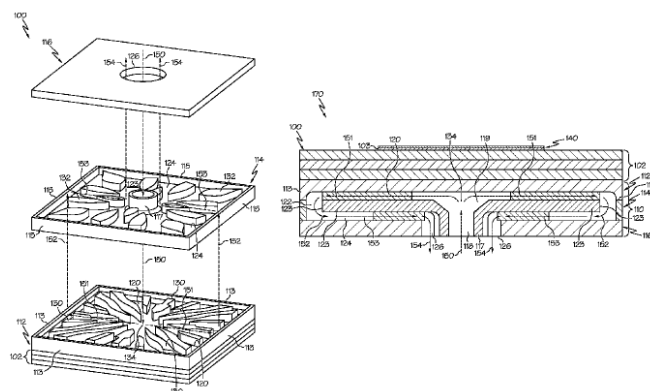
ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย ก่อนที่เจ็ททั้งสองลำจะพุ่งชนพื้นผิว จะเกิดการผสมกันระหว่างลำเจ็ททั้งสอง มีผลทำให้บริเวณโพเทนเชียลคอร์ในลำเจ็ทลดลงและระดับความปั่นป่วนในเจ็ทจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทลำเดียว หรือในกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทสูง ถึงแม้ก่อนเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะไม่เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทที่อยู่ใกล้กัน แต่หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแล้วจะเกิดการชนของเจ็ทผนังที่มาจากลำเจ็ทที่อยู่ติดกันแล้วเกิดการไหลแบบหมุนวน (Fountain) ในระหว่างลำเจ็ท [13]

2.4 การตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน และการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน กรณีที่เป็นไหลแบบต่อเนื่องและไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ

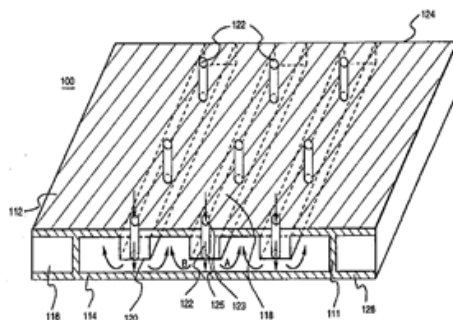
2.4.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน

Erean Mehmet Dede [18] ได้เสนอสิทธิบัตรเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจ็ทพุ่งชน ซึ่งเป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชนตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.11 มีการออกแบบให้มีโครงสร้างของอุปกรณ์ คือ ช่องทางเข้าตรงกลาง มีชั้นที่สองซึ่งเป็นพื้นผิวหลัก และชั้นที่สามซึ่งเป็นพื้นผิวรอง โดยพื้นผิวหลักและพื้นผิวรองจะมีการจัดรูปแบบของวัสดุขวางการไหลเพื่อควบคุมทิศทางของการไหล และมีช่องเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก เพื่อเพิ่มบริเวณพุ่งชนตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางให้ครอบคลุมพื้นที่มาก อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้ในการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เจ็ทพุ่งชน [18]

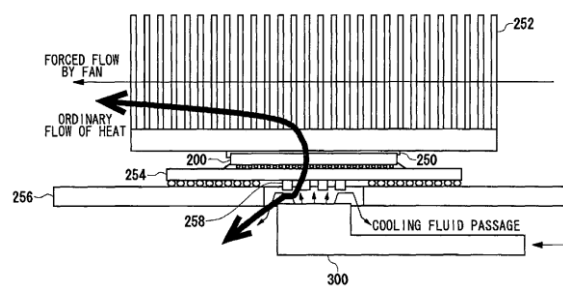
Ronald Scott Bunker [19] ได้เสนอสิทธิบัตรเกี่ยวกับการระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนในผนังห้องเผาไหม้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 โดยออกแบบใช้กับห้องเผาไหม้ที่เป็นผนังคู่ แผ่นหนึ่งไว้สัมผัสกับก๊าซร้อนโดยตรง ส่วนอีกแผ่นใช้สำหรับติดตั้งหัวฉีดเพื่อปล่อยเจ็ทให้ไหลพุ่งชนผนังที่สัมผัสกับก๊าซร้อนทำให้เกิดการระบายความร้อนขึ้น สำหรับสิทธิบัตรนี้ได้มีแนวคิดเกี่ยวกับการจัดระบบการไหลของกระแสไหลทิ้ง (Spent air) ให้ไหลออกอย่างเป็นระบบ เนื่องจากการนำเจ็ทพุ่งชนมาใช้กับห้องเผาไหม้ระบบผนังสองชั้น จะมีปัญหาในเรื่องกระแสไหลทิ้งไหลตัดกลายเป็นกระแสไหลตัด (Cross-flow) ผ่านกระแสมเจ็ทที่กำลังพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนบนพื้นผิวลดลง



รูปที่ 2.12 การระบายความร้อนผนังห้องเผาไหม้ [19]

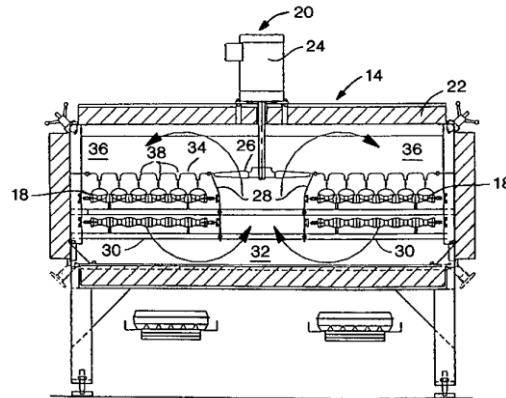
Kazuaki Yazawa [20] ได้เสนอสิทธิบัตรการระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเจ็ทพ่นรวมทั้งระบบระบายความร้อนแบบครีปตามที่แสดงในรูปที่ 2.13 สำหรับโครงสร้างประกอบด้วย ระบบระบายความร้อนหลัก และระบบระบายความร้อนเสริม ซึ่งอยู่ติดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งคู่ โดยจะมีตัวควบคุมระบบระบายความร้อน เพื่อควบคุมให้ระบบระบายความร้อนหลักทำงาน และระบบระบายความร้อนเสริมจะเริ่มทำงานเมื่อมีภาระโหลดความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งการระบายความร้อนของระบบเสริมจะใช้ระบบเจ็ทพ่นในการระบายความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 2.13 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [20]

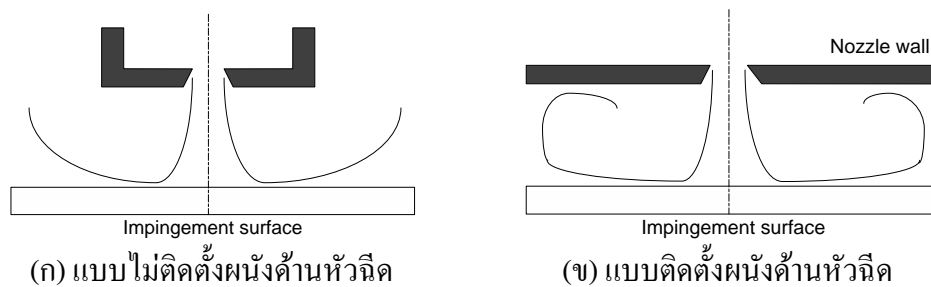
Gary Dee Lang และคณะ [21] ได้เสนอสิทธิบัตรการระบายความร้อนในอุโมงค์แบบสายพานลำเลียง สำหรับสิทธิบัตรนี้เป็นการออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนภายในอุโมงค์ที่มีสายพานลำเลียงวัตถุโดยนำหลักการของเจ็ทพ่นมาใช้ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.14 การลำเลียงมีระบบระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็นสำหรับวัตถุที่ผ่านเข้ามาในอุโมงค์ โดยบริเวณด้านบนของอุโมงค์จะมีกล่องลม (Plenum) ซึ่งมีรูออริฟิตเพื่อกระจายสารหล่อเย็น และมีพัดลมติดตั้งภายในอุโมงค์เพื่อดูดสารหล่อเย็นกลับเข้าไปในกล่องลมโดยดูดกลับให้สารหล่อเย็นที่ออกมามีความเร็วที่เพียงพอต่อการพ่นและระบายความร้อนวัตถุได้ ซึ่งจะเกิดการหมุนเวียนของสารหล่อเย็นภายในอุโมงค์



รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ระบายความร้อนและโครงสร้างภายในอุโมงค์แบบสายพานลำเลียง [21]

2.4.2 งานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพุ้งชนกรณีเจ็ทลำเดียวไหลแบบต่อเนื่อง

Ashforth-Frost และ Jambunathan [15] ได้ศึกษาผลกระทบจากผนังจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ้งชน ในการทดลองได้ใช้หัวฉีดสองประเภทที่ให้ลักษณะการกระจายความเร็วที่ปากทางออกแบบสม่ำเสมอ (Uniform velocity profile) และแบบของเจ็ทที่พัฒนาเต็มที่แล้ว (Fully developed velocity profile) พบว่าส่วนโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) ของเจ็ทที่มีการกระจายความเร็วที่ปากทางออกแบบพัฒนาเต็มที่แล้วจะยาวกว่าของแบบการกระจายความเร็วสม่ำเสมอประมาณ 7% นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทพุ้งชนโดยติดตั้งผนังด้านหัวฉีดเจ็ทตามที่แสดงในรูปที่ 2.15 จากรูปพบว่าการติดตั้งผนังด้านหัวฉีด มีผลทำให้โพเทนเชียลคอร์ยาวกว่าแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีดประมาณ 20% และการติดตั้งผนังด้านหัวฉีดทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลงเมื่อเทียบกับแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด ซึ่งเป็นผลจากการที่เจ็ทถูกจำกัดบริเวณการไหลหลังจากที่พุ้งชนผนัง



รูปที่ 2.15 แสดงเปรียบเทียบการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทพุ้งชน

Ashforth-Frost และคณะ [22] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและโครงสร้างการไหลของเจ็ทจากหัวฉีดแบบช่องสี่เหลี่ยม (Slot nozzle) ที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวัดความเร็วเฉลี่ยและระดับความปั่นป่วน (Turbulence) ตามแนวแกนของเจ็ทและหน้าตัดของเจ็ท จากการศึกษาพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสอดคล้องกับความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่วัดได้ คือในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4W$ (W คือความกว้างของหัวฉีด) ซึ่งเป็นระยะที่โพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ทำให้ระดับความปั่นป่วนจุดที่เจ็ทพุ่งชนบนผนังมีค่าน้อย และในขณะที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิว ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณ คือ จุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=9.2W$ เนื่องจากที่ระยะดังกล่าวโพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทหมดลงทำให้ระดับความปั่นป่วนในเจ็ทสูงขึ้น และเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนที่ระยะห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ

2.4.3 งานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพุ่งชนกรณีเจ็ทลำเดียวแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ

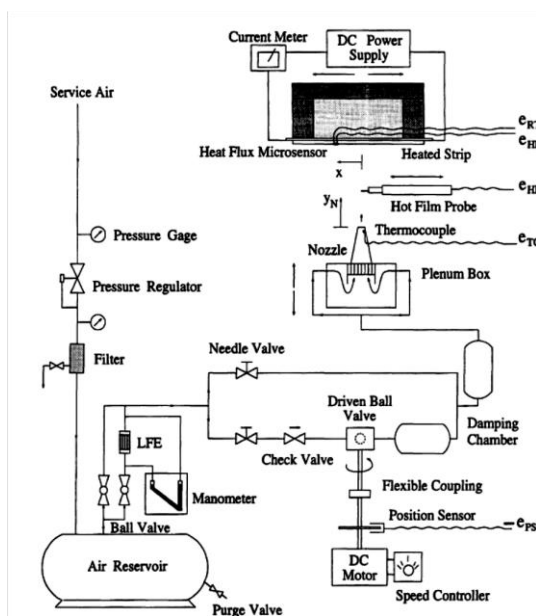
Mladin และ Zumbrunnen [17] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ โดยศึกษาผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $L = 3D-10D$ (D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกเจ็ท) ผลของความถี่ของเจ็ท และผลของแอมพลิจูดในการผันความเร็วของเจ็ท (ขนาดของความเร็วที่ใช้ในการพุ่งชน) โดยแอมพลิจูดความเร็วเจ็ทแสดงอยู่ในรูปของสมการ

$$A_n = \frac{1}{\bar{V}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{V}_j^2} \quad (2.1)$$

โดยที่ \bar{V}	คือความเร็วเฉลี่ยของเจ็ท [m/s]
\tilde{V}_j	คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทในแต่ละคาบ [m/s]
N	คือจำนวนครั้งของจังหวะการไหล

สำหรับกลไกที่ใช้ในการสร้างกระแสการไหลของเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะได้ใช้บอลวาล์วเป็นตัวปิดและเปิดการไหลของอากาศ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.16 ในการบังคับ

จังหวะการไหลโดยต่อแกนหมุนกับมอเตอร์ และใช้มอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบเพื่อบังคับความถี่การปิดและเปิดบอลวาล์ว

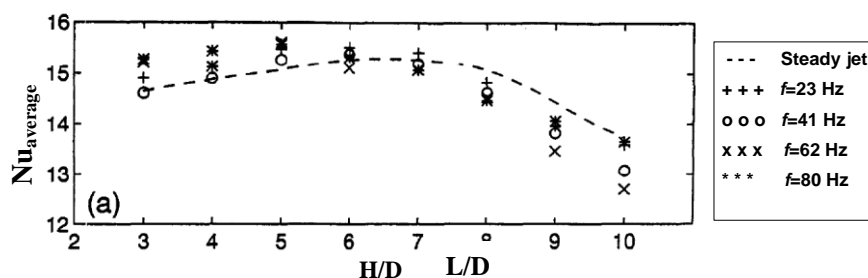


รูปที่ 2.16 แสดงชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างการไหลของเจ็ทแบบสั้นเป็นจังหวะ [17]

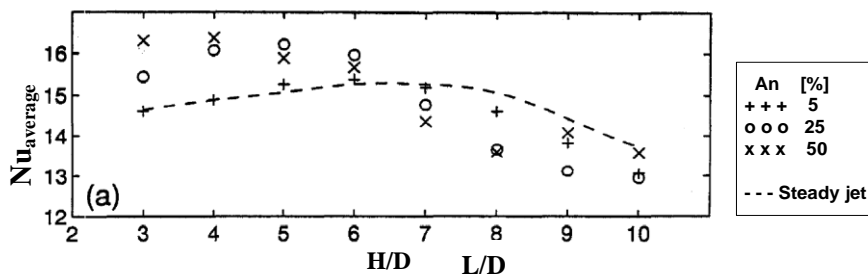
รูปที่ 2.17 แสดงผลของความถี่ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ต่าง ๆ ที่ค่าเรย์โนลด์คัมเบอร์ $Re=10,000$ และเปอร์เซ็นต์ของแอมพลิจูดความเร็วเจ็ท $An=5\%$ จากการทดลองพบว่าที่ระยะ $L=3D-6D$ เจ็ทพุ่งชนแบบไหลสั้นเป็นจังหวะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทพุ่งชนไหลแบบต่อเนื่อง โดยที่ระยะ $L=3D-5D$ เจ็ทพุ่งชนแบบไหลสั้นเป็นจังหวะที่มีความถี่ $f=80$ Hz ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุด แต่สำหรับที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่อยู่ในช่วง $L=8D-10D$ เจ็ทพุ่งชนแบบไหลต่อเนื่องให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบสั้นเป็นจังหวะทุก ๆ กรณี

รูปที่ 2.18 แสดงผลของแอมพลิจูดของความเร็วในการสั้นของเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่าง ๆ ที่ค่าเรย์โนลด์คัมเบอร์ $Re=10,000$ และความถี่ $f=41$ Hz จากรูปพบว่า ที่ระยะ $L=3D-4D$ แอมพลิจูดความเร็ว $An=50\%$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุด และที่ระยะ $L=5D-6D$ แอมพลิจูดความเร็ว $An=25\%$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุด สำหรับที่ระยะ $L>7D$ เจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดำกว่าของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง

จากผลการทดลอง Mladin และ Zumbrennen [17] พบว่า เจ็ทพุงชนแบบไหลสั้น เป็นจังหวะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องเฉพาะในช่วง ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนอยู่ในช่วง $L < 6D$ โดยในช่วง $L < 4D$ ความถี่และ แอมพลิจูดความเร็วที่สูงจะมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และที่ ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนอยู่ในช่วง $L < 7D$ เจ็ทพุงชนแบบไหลสั้นจังหวะ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดำกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง

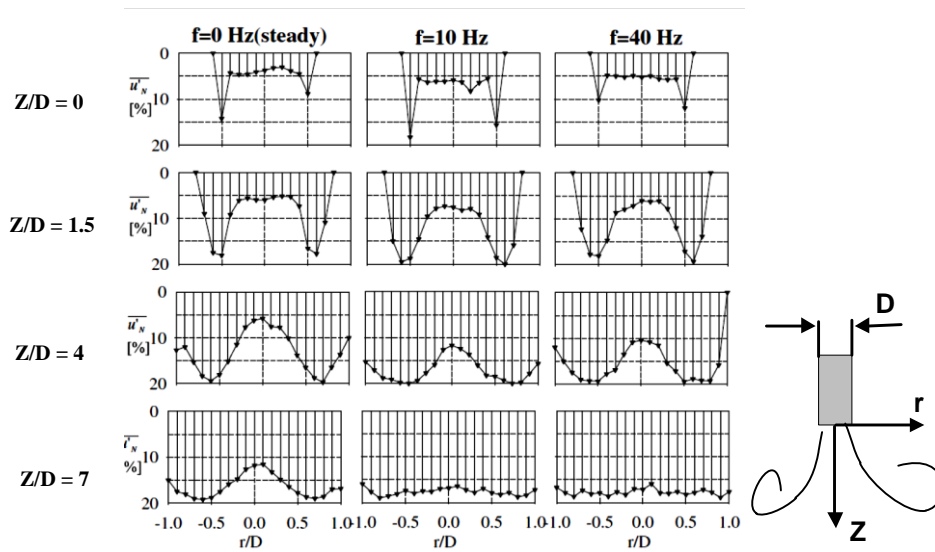


รูปที่ 2.17 แสดงผลของความถี่ที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท ถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนต่าง ๆ ($Re=10,000$ และเปอร์เซ็นต์ของแอมพลิจูดความเร็วเจ็ท $An=5\%$) [17]

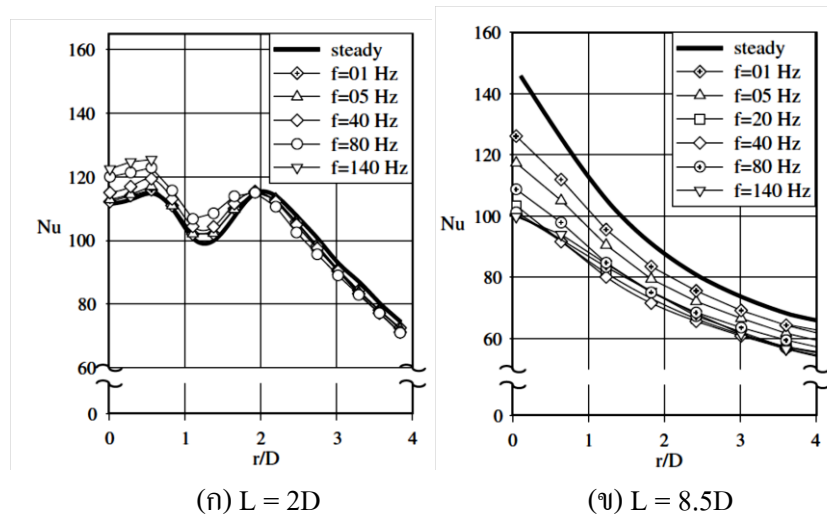


รูปที่ 2.18 แสดงผลของแอมพลิจูดความเร็วเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ระยะห่าง จากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนต่าง ๆ ($Re=10,000$ และ $f=41\text{Hz}$) [17]

Hofmann และคณะ [23] ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบน พื้นผิวที่เจ็ทพุงชนแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ ในการศึกษาได้พิจารณาโน้ตเชลด์นัมเบอร์เฉพาะจุด (Local Nusselt number) ที่กระจายบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน รูปที่ 2.19 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ใน การทดลอง จากรูปกลไกที่ใช้ในการสร้างกระแสเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะมีการติดตั้งวาล์วที่ ตำแหน่งระหว่างถังพักลมกับหัวฉีด และใช้วิธีการหมุนวาล์วด้วยมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็ว รอบเพื่อปรับความถี่ในการเปิดปิดวาล์ว รูปที่ 2.20 แสดงการกระจายของความปั่นป่วนของเจ็ทที่ ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับที่ตำแหน่งปากทางออกเจ็ท $Z/D = 0$ เจ็ทแบบ



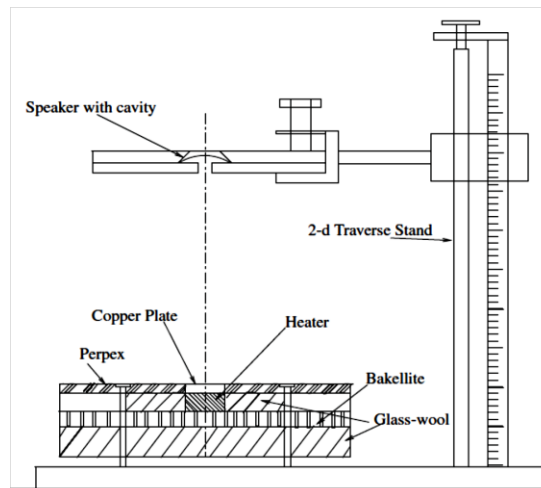
รูปที่ 2.20 แสดงการกระจายของความปั่นป่วนที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทตำแหน่งต่าง ๆ [23]



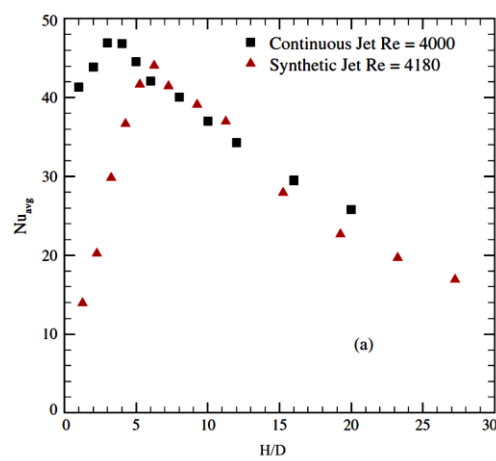
รูปที่ 2.21 แสดงการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($Re=34,000$) [23]

Chaudhari และคณะ [24] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนแบบไหลสั้นเป็นจังหวะโดยการออกแบบกลไกที่ใช้ในการกำเนิดจังหวะการไหลของเจ็ทแบบใช้ลำโพง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ติดตั้งด้านหลังของปากทางออกเจ็ทตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.22 ในการทดลองได้ป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ 4V และควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะควบคุมจังหวะการไหลของเจ็ท รูปที่ 2.23 แสดงการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (L) ต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างผลของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ จากรูปพบว่าที่ระยะ $L < 6D$ (D คือเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท) เจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทแบบต่อเนื่อง และที่ระยะ $L > 6D$ เจ็ทแบบไหลต่อเนื่องให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะเล็กน้อยจากผลของระยะฟุ้งชน L จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mladin และ Zumbrunnen [17] และ Hofmann และคณะ [23]



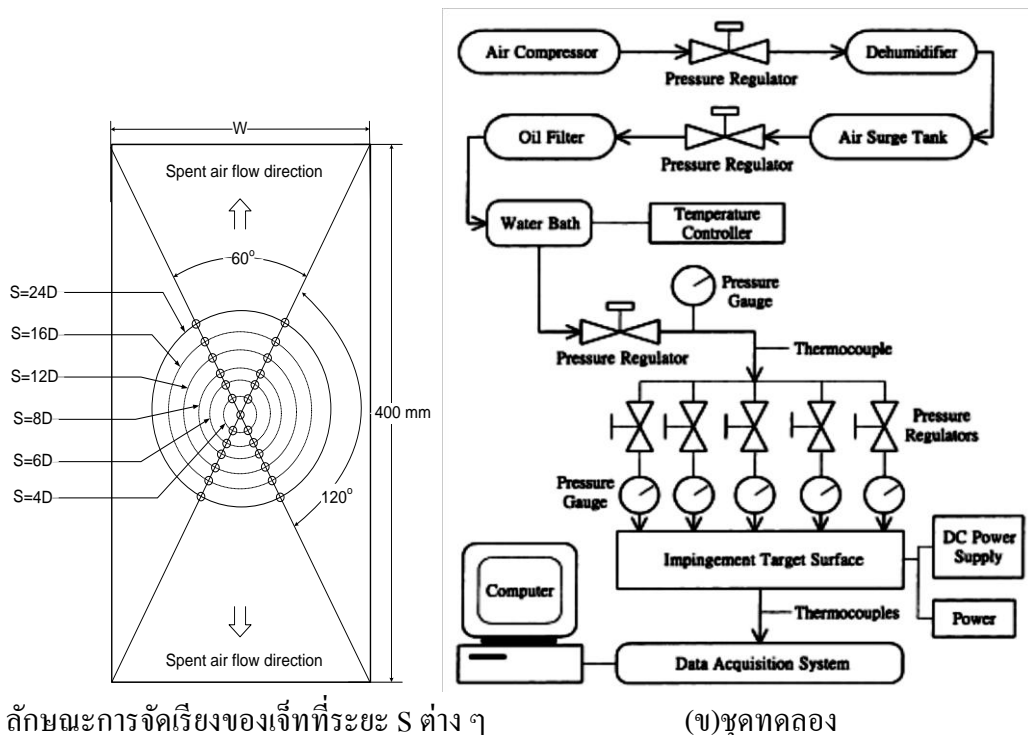
รูปที่ 2.22 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ [24]



รูปที่ 2.23 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน (L) ต่าง ๆ โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท [24]

2.4.4 งานวิจัยเกี่ยวกับเจ็ทพ่นชนกรณีเจ็ทกลุ่มแบบไหลต่อเนื่อง

สำหรับตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีกลุ่มของเจ็ท ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงกลุ่มของเจ็ท ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพ่นชน (L) เป็นต้น



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ทและชุดทดลองการทดลองของ San และ Lai [6]

San และ Lai [6] ได้ทำการทดลองโดยใช้กลุ่มของเจ็ท 5 ลำพ่นชนพื้นผิวเรียบโดยใช้ท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 mm ในการจัดเรียงของเจ็ทกำหนดให้เจ็ท 1 ลำ อยู่ตรงกลางและเจ็ท 4 ลำที่เหลือล้อมรอบตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.24 ในการทดลองได้กำหนดระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพ่นชน $L=2D, 3D, 4D$ และ $5D$ (D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท) ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ในช่วง $Re=10,000-30,000$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทจะอยู่ในช่วง $S=4D-24D$ จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลทำให้บริเวณที่เจ็ทที่อยู่ตรงกลางพ่นชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือ ที่เงื่อนไขระยะ $L=2D$ และระยะ $S=8D$ ที่เงื่อนไขระยะ $L=3D$ และระยะ $S=12D$ และที่เงื่อนไขระยะ $L=5D$ และระยะ $S=6D$

Geers และคณะ [25] ได้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพ่นชน (L) และระยะห่างระหว่างเจ็ท (S) ในกรณีของกลุ่มเจ็ทที่มีหน้าตัดกลมพ่นชนพื้นผิว โดย

กำหนดระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $L=3D-10D$ (D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท) และระยะห่างระหว่างเจ็ทอยู่ในช่วง $S=2D-6D$ จากการศึกษาพบว่า ที่ระยะ $L=3D-6D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าที่ระยะ $L=8D-10D$ สำหรับผลของตัวแปรระยะห่างระหว่างเจ็ท พบว่าที่ระยะ $S=4D$ บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงมีพื้นที่กว้างกว่าที่ระยะ $S=2D$ และมีความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าที่ระยะ $S=6D$

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยพบว่า การเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนสามารถทำได้โดยการเพิ่มการสั่นการไหลของเจ็ท แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทพุ่งชนแบบไหลสั่นเป็นจังหวะส่วนใหญ่จะศึกษาเฉพาะกรณีที่เป็นเจ็ทแบบเดี่ยว ซึ่งมีข้อจำกัดสำหรับการนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรม สำหรับในงานวิจัยนี้จะนำเจ็ทพุ่งชนแบบไหลสั่นเป็นจังหวะมาใช้ในกรณีที่เป็นเจ็ทแบบกลุ่ม ซึ่งสามารถประยุกต์นำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้มากขึ้น โดยในงานวิจัยจะศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เช่น ผลของความถี่การสั่นเป็นจังหวะ ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

บทที่ 3

ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดชุดทดลองสร้างเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ รายละเอียดของชุดทดลอง เงื่อนไขการทดลอง วิธีการทดลอง ในส่วนของการทดลองจะแบ่งออกเป็นสามส่วนหลักคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะและเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยแผ่นเทอร์โมลิวคิคริสตัล และส่วนที่สามจะเป็นการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน เพื่อคุณลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่บริเวณปากทางออกและอธิบายกลไกในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ

3.1 รายละเอียดของชุดทดลอง

รูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงภาพถ่ายและรายละเอียดชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะพุ่งชน สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

(1) พัดลม (Blower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป่าอากาศให้เกิดการไหลในระบบ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 5 แรงม้า เป็นตัวขับเคลื่อนของพัดลม ซึ่งขนาดของกำลังที่ขับเคลื่อนเพียงพอต่อการสร้างอัตราการไหลในกรณีที่เป็นกลุ่มของเจ็ท 9 ท่อ สำหรับการปรับอัตราการไหลให้ได้ตามที่กำหนดจะใช้วิธีการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ควบคุม

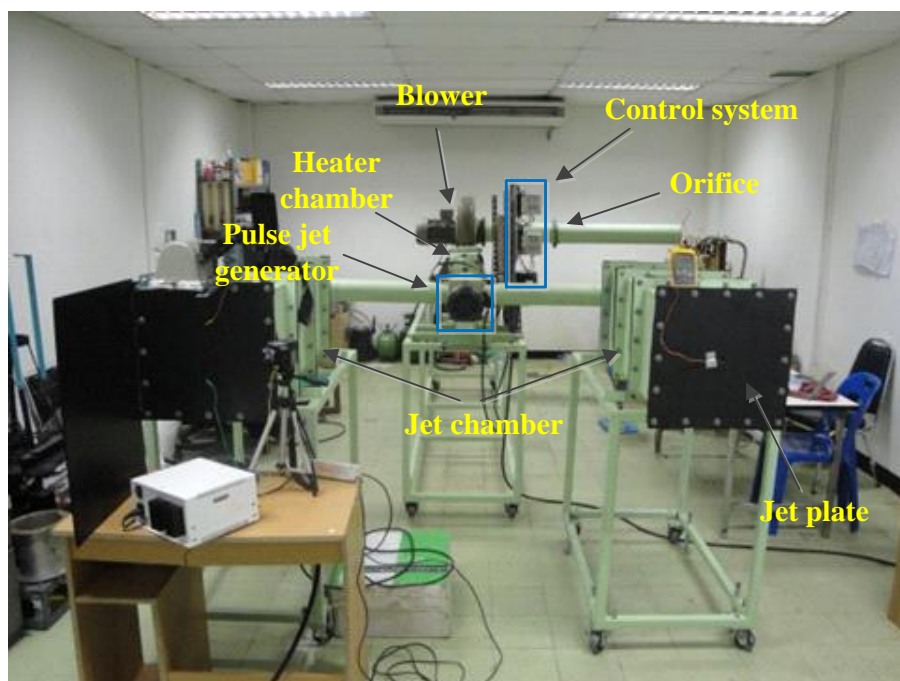
(2) ออริฟิส (Orifice) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศจากผลต่างความดันสองจุดคือความดันของอากาศก่อนผ่านออริฟิสและหลังผ่านออริฟิส โดยใช้मानอมิเตอร์ที่บรรจุน้ำเป็นของเหลววัดความดัน

(3) ฮีตเตอร์และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Heater and temperature controller) เป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศและควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทให้คงที่ ในการทดลองใช้ฮีตเตอร์เป็นตัวให้ความร้อน และควบคุมฮีตเตอร์ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิซึ่งต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ติดตั้งบริเวณตรงกลางของห้องกักอากาศ ซึ่งชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ได้อยู่ในช่วง $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$

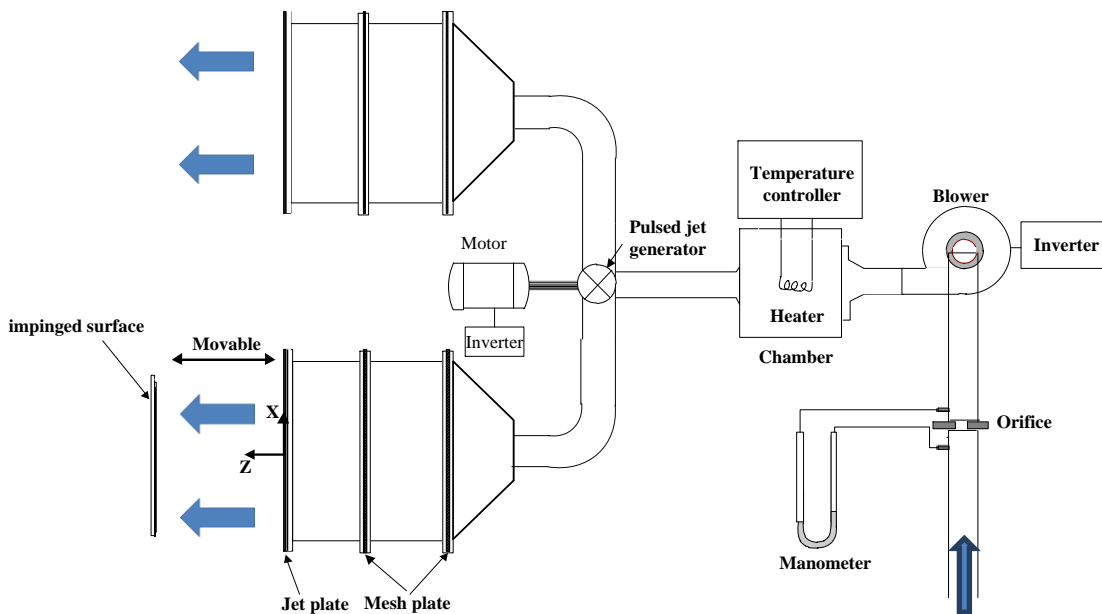
(4) ห้องกักอากาศ (Air chamber) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อเก็บรักษาความดันของอากาศให้คงที่ตลอดหน้าแปลนที่ติดตั้งแผ่นเจ็ท

(5) แผ่นรูเจ็ท (Jet plate) ทำจากแผ่นเหล็กกล้าเคลือบจัตร์สหนา 1.5 mm และมีขนาดกว้าง x ยาวเท่ากับ 44 cm x 44 cm และนำมาเจาะรู มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 16 mm ในกรณีการทดลองของเจ็ทลำเดี่ยวแผ่นเจ็ทถูกเจาะรูบริเวณจุดกึ่งกลางของแผ่นเจ็ท ส่วนในกรณีการทดลองกลุ่มของเจ็ทมีรูทั้งหมด 9 รู มีทั้งหมด 3 แถว แถวละ 3 รู

(6) ระบบสร้างการไหลแบบเป็นจังหวะ (Pulse jet generator) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำให้เกิดการไหลแบบเป็นจังหวะ โดยใช้กลไกการเปิด-ปิดของวาล์ว (Ball valve) และใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ในการเปิด-ปิด ซึ่งรายละเอียดของระบบสร้างการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะนั้นจะกล่าวในหัวข้อ 3.2



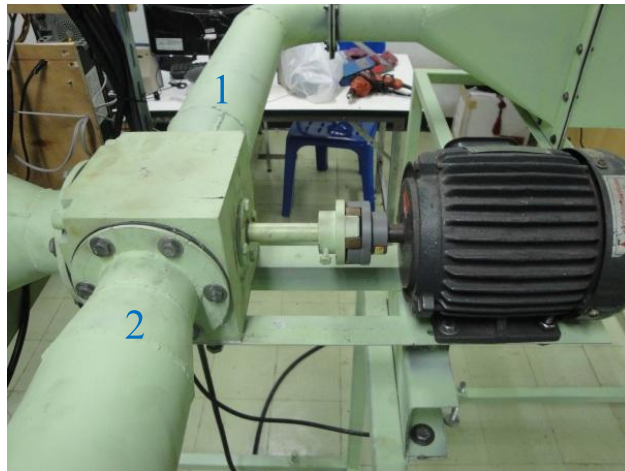
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายชุดทดลองที่ใช้ในการทดลอง



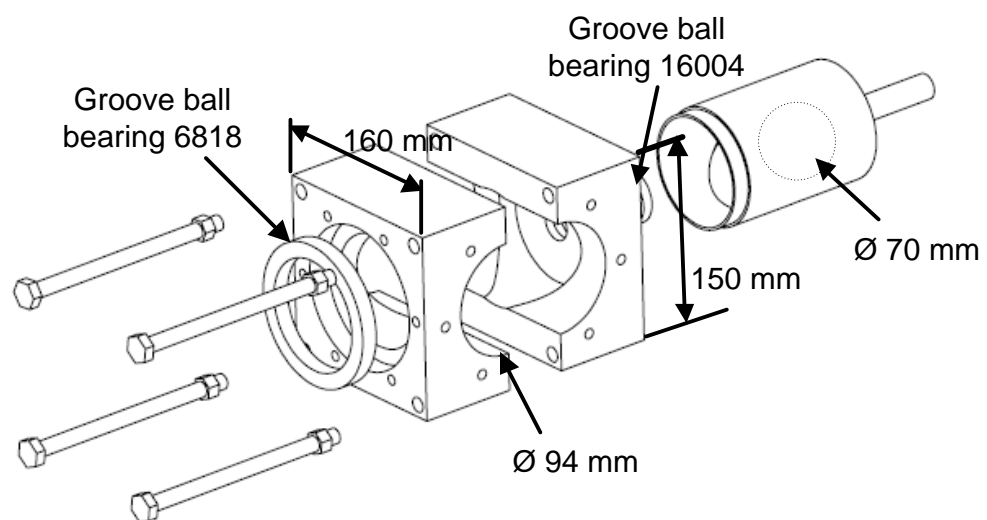
รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลอง

3.2 กลไกการทำงานของระบบสร้างการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ

รูปที่ 3.3 แสดงกลไกการควบคุมการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ สำหรับศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและลักษณะการไหลของเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะพุ่งชน ได้ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการไหลแบบเป็นจังหวะดังรูปที่ 3.3(ก) ซึ่งระบบควบคุมการไหลทำงานโดยมอเตอร์จะไปขับทรงกระบอกภายในซึ่งประกบกันด้วยชุดต่อประกบ (Coupling) โดยลักษณะของทรงกระบอกภายในเจาะรูเป็นรูปตัว L ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข) เมื่อมอเตอร์หมุนครึ่งรอบของรูปตัว L ของทรงกระบอกจากที่เคยอยู่ตรงตำแหน่งที่ 1 ก็จะหมุนตามมอเตอร์ไปที่ตำแหน่งที่ 2 ทำให้การไหลของอากาศจะถูกบังคับให้ไหลไปยังทิศทางตรงข้าม คือ เข้าห้องกักอากาศด้านซ้ายเมื่อมอเตอร์หมุนครบรอบก็จะทำให้รูของทรงกระบอกกลับมาอยู่ตำแหน่งที่ 1 จะบังคับให้ไหลเข้าห้องกักอากาศด้านขวาและเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้การไหลของอากาศสลับช่องทางการไหลไปมาระหว่างตำแหน่งที่ 1 และ 2 ทำให้เกิดการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะขึ้นในแต่ละห้องกักอากาศ เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้การสลับตำแหน่งไปมาเกิดขึ้นบ่อยครั้ง จนกลายเป็นการไหลสั้นแบบจังหวะด้วยความถี่สูงขึ้น โดยในการทดลองศึกษานี้ได้ใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์



(ก) ภาพถ่ายของชุดควบคุมการไหลแบบสันเป็นจิ้งหะ



(ข) ลักษณะภายในของชุดควบคุม

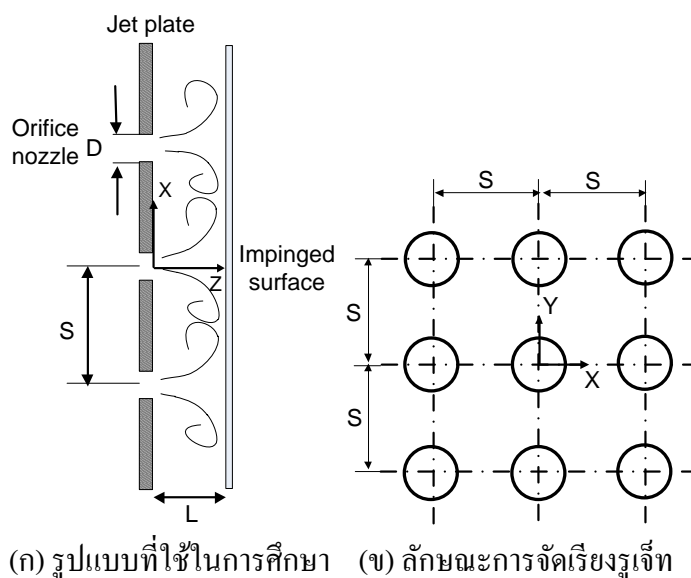
รูปที่ 3.3 แสดงกลไกการควบคุมการไหลแบบสันเป็นจิ้งหะ

3.3 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและลักษณะการไหลที่เจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลสันเป็นจิ้งหะ โดยจะศึกษาทั้งกรณีที่เป็นเจ็ทลำเดียว และกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

รูปที่ 3.4 แสดงโมเดลที่ใช้ในการศึกษาในกรณีที่เป็นกลุ่มเจ็ท 9 รู โดยกำหนดให้ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ทเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัด แกน X อยู่ในแนวนอน แกน Y อยู่ในแนวตั้ง และแกน Z อยู่ในแนวระยะห่างระหว่างปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับ

จุดทดลองสามารถปรับระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและเปลี่ยนแผ่นเจ็ทเพื่อศึกษาระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) ได้

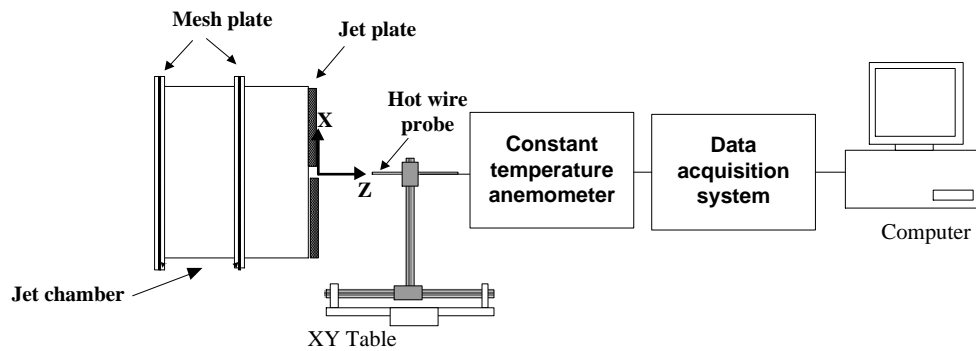


รูปที่ 3.4 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลอง

3.4 การวัดความเร็วและความถี่ของเจ็ท

3.4.1 รายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ศึกษา

ในรูปที่ 3.5 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดความเร็วและความถี่ของเจ็ท เพื่อศึกษาการกระจายความเร็วของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะ โดยติดตั้งหัววัดความเร็วแบบลวดร้อนรูปตัว I (Hot-wire probe type I, ยี่ห้อ Dantec dynamics รุ่น 55P16) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดร้อน $5 \mu\text{m}$ และยาว 1.25 mm มีช่วงในการวัดความเร็วตั้งแต่ 0.05 m/s – 500 m/s สามารถวัดความเร็วที่ความถี่สูงสุด 400 kHz หัววัดนี้ถูกติดตั้งกับชุดปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D Transverse system, XY Table) โดยหัววัดความเร็วจะต่อกับเครื่องวัดความเร็วลมแบบอุณหภูมิคงที่ (Constant temperature anemometer, CTA, ยี่ห้อ Dantec Dynamic รุ่น 54T30) เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดลวดร้อนเป็นความเร็วของลมและเก็บข้อมูลผ่านตัวเก็บข้อมูล (Data acquisition system, DAQ, ยี่ห้อ National Instrument Measurement รุ่น NI 9215) และบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์หาความเร็วเฉลี่ยและระดับความปั่นป่วนต่อไป



รูปที่ 3.5 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดความเร็วและความถี่ของเจ็ท

สำหรับการวัดการกระจายความเร็วใช้อุณหภูมิของเจ็ท 27°C โดยวัดความเร็ว 2 แกน คือระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทที่ตำแหน่ง $Z=0D, 2D, 4D, 6D, 8D$ และตามแนว X ในช่วง $-1.5D \leq X/D \leq 1.5D$ โดยจุดเริ่มต้นของการวัดจะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของรูเจ็ท ในการเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์นั้นใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูล (Sample of frequency) 2 kHz และจำนวนตัวอย่างในการเก็บข้อมูล (Number of samples) 10,000 ตัวอย่าง และนำข้อมูลของความเร็วที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลของความเร็วให้อยู่ในรูปของความถี่ ซึ่งความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ ความถี่หลักของการสั่นของเจ็ท

สำหรับความเร็วเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการดังนี้

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i}{N} \quad (3.1)$$

โดยที่ \bar{W} คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในแนวแกน Z [m/s]
 W_i คือ ความเร็วที่เกิดขึ้น ณ เวลาใด [m/s]
 N คือ จำนวนข้อมูล ($N=10,000$)

สำหรับความเร็วที่เปลี่ยนแปลง (Fluctuation velocity) ณ เวลาใด คำนวณจากสมการดังนี้

$$W'_i = W_i - \bar{W} \quad (3.2)$$

$$W_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (W'_i)^2}{N}} \quad (3.3)$$

โดยที่ W'_i คือ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด [m/s]

W_{rms} คือ ความเร็วเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด [m/s]

สำหรับความปั่นป่วนของความเร็ว (Turbulence intensity) ในการทดลองคำนวณจากสมการดังนี้

$$Tu = \frac{W_{rms}}{\bar{W}} \quad (3.4)$$

สำหรับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการดังนี้

$$Re = \frac{D\bar{W}_j}{\nu} \quad (3.5)$$

โดยที่ D คือ ขนาดเส้นศูนย์กลางของรูเจ็ท [m]

\bar{W}_j คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่ปากทางออก [m/s]

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ [kg/(m·s)]

สำหรับค่าสโตวฮาวล์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$St = \frac{fD}{\bar{W}_0} \quad (3.6)$$

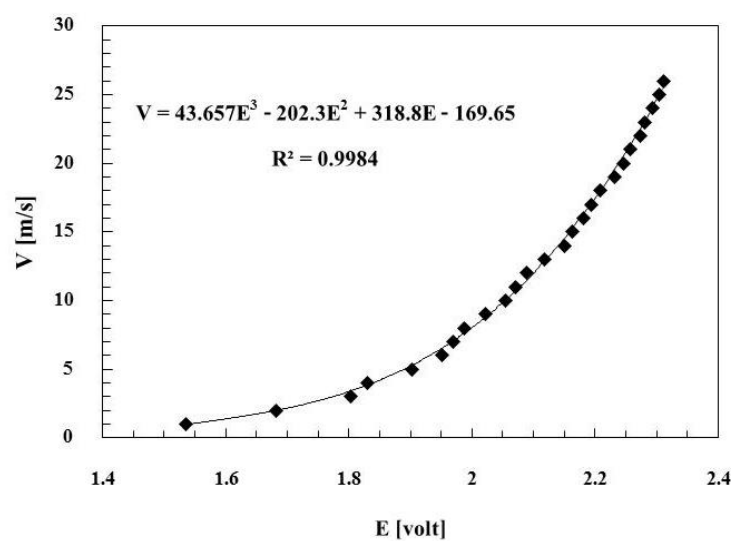
โดยที่ f คือ ความถี่หลักการสั่นของเจ็ท [Hz]

\bar{W}_0 คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ปากทางออก [m/s]

3.4.2 การสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน

ในการใช้หัววัดความเร็วแบบลวดร้อนเพื่อวัดการกระจายของความเร็วเจ็ท จำเป็นต้องสอบเทียบความเร็วลม โดยใช้อุปกรณ์สอบเทียบวัดความเร็วลม Pitot-static tube ซึ่งต่อเข้ากับமானอมิเตอร์สำหรับวัดผลต่างความดัน และนำมาคำนวณเป็นค่าความเร็ว เริ่มต้นนำหัววัด

ความเร็วแบบลวดร่อนและ Pitot-static tube มาติดตั้งกับชุดจับยึด เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของหัววัดทั้งสองชนิด โดยตำแหน่งที่สอบเทียบคือจุดศูนย์กลางของรูเจ็ทจากนั้นทำการวัดความเร็วด้วย Pitot-static tube และหัววัดแบบลวดร่อนตามลำดับ ซึ่งกำหนดช่วงของความเร็วตั้งแต่ 2–26 m/s และอุณหภูมิของเจ็ท 27°C ซึ่งเป็นช่วงของความเร็วที่ใช้ในการทดลอง หัววัดความเร็วแบบลวดร่อนจะวัดสัญญาณออกมาเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) และสร้างเป็นสมการในการคำนวณความเร็วดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความเร็วที่สอบเทียบ

ผลการสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วแบบลวดร่อนจะนำมาสร้างสมการทำนายความเร็วดังนี้

$$V = 43.657E^3 - 202.3E^2 + 318.83E - 169.65 \quad (3.7)$$

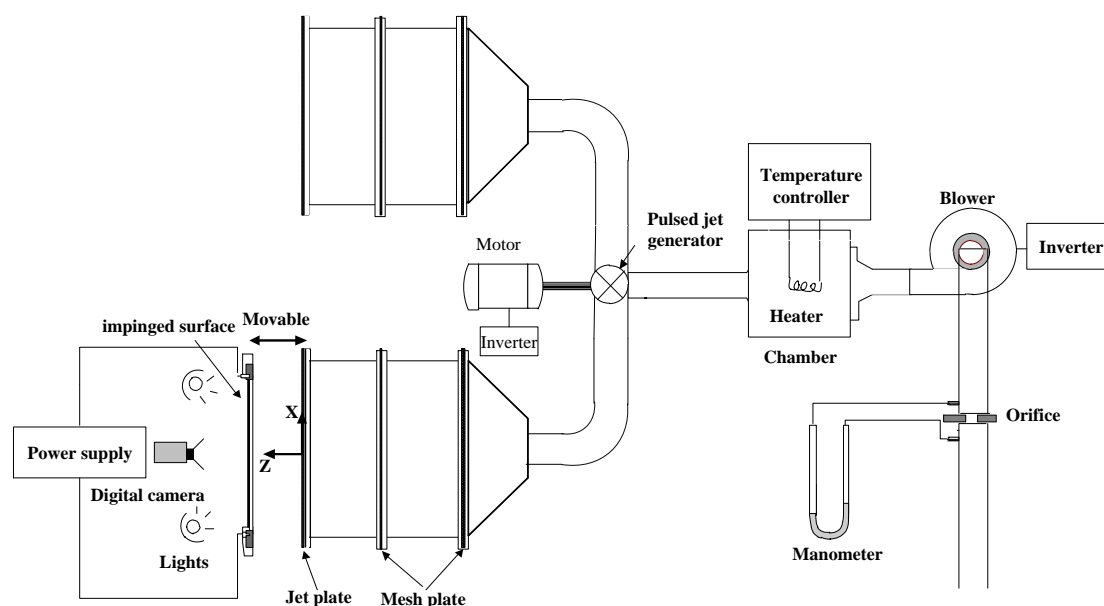
3.5 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

รูปที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวโดยแผ่นที่เจ็ทพุ่งชน (Impinged plate) ในการทดลองใช้แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัล (Thermochromic liquid crystal, TLC) ติดด้านหลังแผ่นสเตนเลสแบบบาง (ด้านตรงข้ามกับพื้นผิวที่พุ่งชน) แผ่นเทอร์โมลิควิดคริสตัลที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบแผ่นฟิล์มพร้อมติด (บริษัท OMEGA, รุ่น LCS104) คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงสี จากสีดำเปลี่ยนเป็นสีแดง เหลือง เขียว

และน้ำเงิน ในช่วงอุณหภูมิ 29°C - 46°C ในการทดลองใช้แผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 0.03 mm เป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยแผ่นสแตนเลสจะถูกยิงให้เรียงติดกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด $240\text{ mm}\times 240\text{ mm}$ ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองจะต่อเข้ากับขั้วของอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส ซึ่งอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาในการทดลองชุดนี้คือ

(1) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายไฟกระแสตรง (DC) ให้กับแผ่นสแตนเลส เพื่อให้เกิดฟลักซ์ความร้อนขึ้น โดยสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 50 A และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 20 V

(2) กล้องบันทึกภาพแบบดิจิทัล (Digital camera) สามารถบันทึกความละเอียดของภาพ 640×480 จุด มีความละเอียดของระดับสี 8 บิต

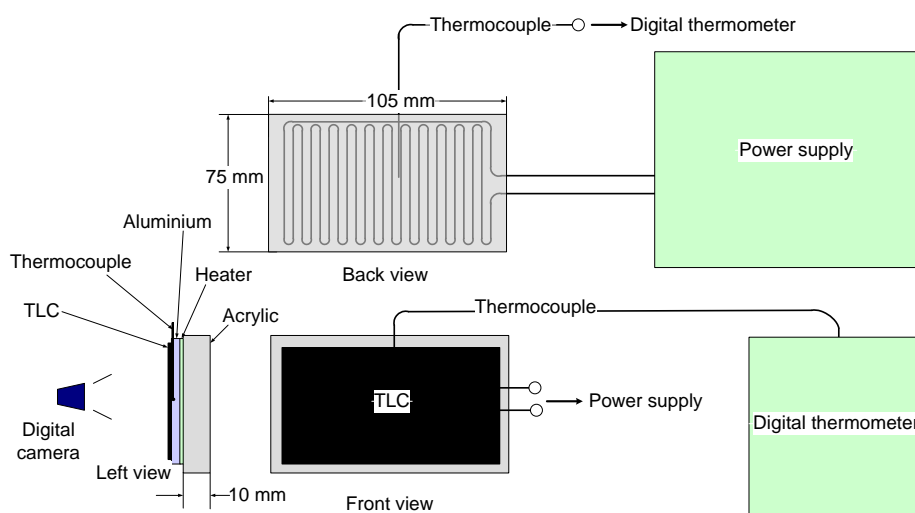


รูปที่ 3.7 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

3.5.1 การสอบเทียบของแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล

ในการใช้แผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว จำเป็นต้องสอบเทียบอุณหภูมิกับสิ่งที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลก่อนใช้งาน รูปที่ 3.8 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบ โดยแผ่นฮีตเตอร์ติดบนแผ่นพลาสติกใสที่มีขนาดความกว้าง 75 mm ยาว 105 mm และหนา 10 mm ขั้วของแผ่นฮีตเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ

กระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของแผ่นฮีตเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 mm ซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากแผ่นฮีตเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่มีขนาดความกว้าง 47 mm ความยาว 70 mm เพื่อแสดงสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ ส่วนด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล สำหรับแผ่นอะลูมิเนียมได้เจาะร่องสำหรับติดสายเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 6 จุด เพื่อวัดอุณหภูมิแต่ละจุดมาเฉลี่ยค่าอุณหภูมิเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงที่บันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีนั้นได้กำหนดเงื่อนไขให้เหมือนกับสถานะในการทดลองจริง ได้แก่ การให้แสงสว่างบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลและระยะห่างของกล้องบันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 29°C – 46°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลเริ่มแสดงสีจนถึงสีน้ำเงินเข้ม



รูปที่ 3.8 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล [4]

สำหรับขั้นตอนในการสอบเทียบสีนั้น เริ่มโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิเฉลี่ยบนแผ่นอะลูมิเนียมเท่ากับ 46°C ซึ่งแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลจะแสดงสีน้ำเงินเข้ม แล้วจึงบันทึกภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล โดยในการสอบเทียบสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะลดอุณหภูมิตั้งแต่ 0.2°C โดยการลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายแก่ฮีตเตอร์ ในระหว่างสอบเทียบที่แต่ละอุณหภูมิจะรอจนอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวก่อน จึงบันทึกภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบสีแต่ละภาพมาแยกให้อยู่ในระบบสี RGB (Red, Green, Blue) จากนั้นวิเคราะห์ให้อยู่ในระบบสี HSI (Hue, Saturation, Intensity)



(ก) 29.5°C (ข) 30.5°C (ค) 31.5°C (ง) 32.5°C (จ) 33.5°C (ฉ) 34.5°C



(ช) 35.5°C (ซ) 36.5°C (ฅ) 37.5°C (ญ) 38.5°C (ฎ) 39.5°C (ฏ) 40.5°C



(ฐ) 41.5°C (ฑ) 42.5°C (ฒ) 43.5°C (ณ) 44.5°C (ด) 45.5°C (ต) 46.5°C

รูปที่ 3.9 แสดงสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดยของระบบสี RGB และ HSI มีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{cases} \frac{1}{360} \left[90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right) \right] & \text{For } G > B \\ \frac{1}{360} \left[90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right) + 180 \right] & \text{For } G < B \end{cases} \quad (3.8)$$

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

$$F = R \quad \text{For } G = B$$

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (3.9)$$

$$S = 1 - \left[\frac{\min(R, G, B)}{I} \right] \quad (3.10)$$

โดยที่ R คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีแดงในภาพ

G คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีเขียวในภาพ

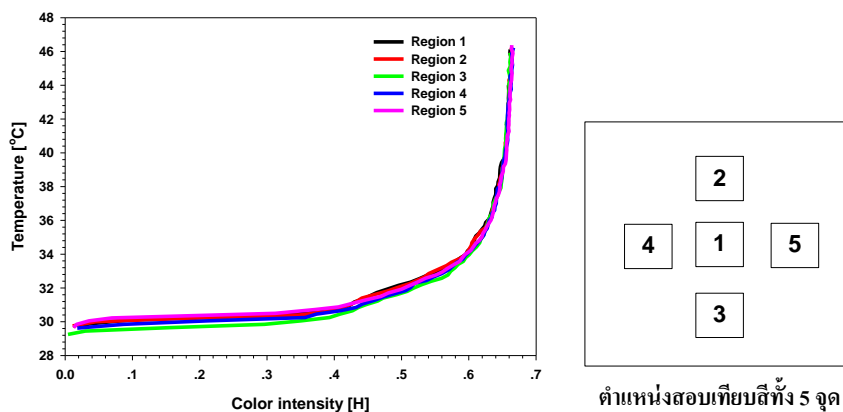
- B* คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีน้ำเงินในภาพ
H คือ แสดงค่าเฉลี่ยสีในภาพ
S คือ แสดงค่าการอิ่มตัวของสีในภาพ
I คือ แสดงค่าความมืดความสว่างของสีในภาพ

จากสมการที่ 3.8-3.10 ค่าความเข้มขององค์ประกอบสี *R*, *G*, *B* ในแต่ละภาพ สามารถแปลงเป็นข้อมูลสี *H*, *S*, *I* โดยใช้โปรแกรม MATLAB รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตัวประกอบเฉลี่ย *H* โดยให้แกนนอนแสดงค่าเฉลี่ยและแกนตั้งแสดงค่าอุณหภูมิในรูปแบบแสดงผลการสอบเทียบ 5 ตำแหน่งบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่ใช้ทดลองจริง เนื่องจากแผ่นนี้มีขนาดใหญ่จึงแบ่งบริเวณที่ทำการสอบเทียบด้วยชุดสอบเทียบ 5 บริเวณ คือ บริเวณตรงกลางพื้นผิวฟุ้งชน บริเวณด้านซ้าย-ขวาของพื้นผิวฟุ้งชน และบริเวณด้านบน-ล่างของพื้นผิวฟุ้งชน ซึ่งผลการสอบเทียบของทั้ง 5 บริเวณซ้อนทับกันดี และค่าเฉลี่ย *H* มีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถใช้ข้อมูลของทั้งสามบริเวณมาสร้างเส้นสมการสำหรับทำนายอุณหภูมิได้ดังนี้

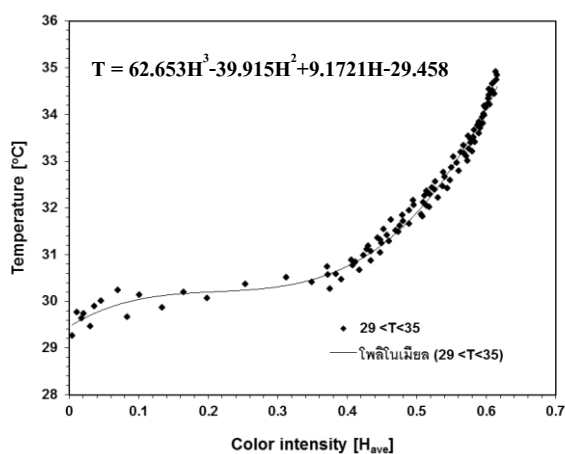
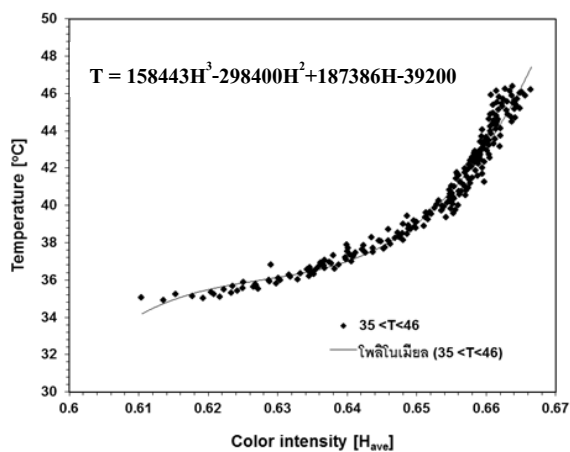
$$T = 157021H^3 - 295642H^2 + 185603H - 38816 \quad ; 35^\circ C \leq T \leq 46^\circ C \quad (3.11)$$

$$T = 62.653H^3 - 39.915H^2 + 9.1721H - 29.458 \quad ; 29^\circ C \leq T < 35^\circ C \quad (3.12)$$

รูปที่ 3.11 แสดงเส้นของสมการทำนายอุณหภูมิที่สร้างขึ้นเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบทั้ง 5 บริเวณ พบว่าเส้นสมการสามารถใช้ทำนายอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีในช่วง $29^\circ C \leq T \leq 46^\circ C$



รูปที่ 3.10 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงเจดสีเทียบกับอุณหภูมิทั้ง 5 บริเวณที่สอบเทียบสี



รูปที่ 3.11 แสดงเส้นสมการที่ใช้ทำนายอุณหภูมิเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบทั้ง 5 บริเวณ

3.5.2 ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับขั้นตอนการทดลองได้ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ขับพัดลมเพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่กำหนด โดยใช้อร์บิฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล จากนั้นอากาศจะไหลผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิห้องที่มีชุดฮีทเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ ก่อนที่ไหลผ่านชุดสร้างการไหลแบบสันแล้วจึงไหลเข้าห้องและอากาศไหลออกมาทางรูออร์บิฟิสบนแผ่นเจ็ท ก่อนพุ่งชนผนังที่ติดตั้งไว้ด้านหน้า หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างระหว่างผนังและผนังที่เจ็ทพุ่งชน ในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่ 27°C พุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแผ่นสแตนเลสทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นสแตนเลสเมื่อเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการระบายความร้อนขึ้นบนแผ่นสแตนเลสทำให้แผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลที่ติดตั้งด้านหลังแผ่นสแตนเลสเกิดการเปลี่ยนสี หลังจากรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจึงบันทึกภาพสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัลลงด้วยกล้องดิจิทัล เพื่อทำการประมวลผลหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ต่อไป

โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \sigma \varepsilon_{TLC} (\overline{T}_w^4 - T_s^4) - h_c (\overline{T}_w - T_j)}{T_w - T_j} \quad (3.13)$$

โดยอัตราการเกิดความร้อนบนแผ่นฮีทเตอร์ (\dot{q}_{input}) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{input} = \frac{I^2 R}{A} \quad (3.14)$$

โดยที่ I	คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส [A]
R	คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส [Ω]
A	คือ พื้นผิวของแผ่นสแตนเลส [m^2]
T_w	คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล [K]
\overline{T}_w	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน [K]
T_j	คือ อุณหภูมิของเจ็ท [K]
T_s	คือ อุณหภูมิห้อง [K]
ε_{TLC}	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นเทอร์โมลิวคิตคริสตัล มีค่าเท่ากับ 0.9 [25]

h_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ [W/(m²·K)] [26]

σ คือ ค่า Stefan Boltzman เท่ากับ 5.670373×10^{-8} W/m²·K⁴

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (h_c) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h_c = \frac{Nu_L k}{L} \quad (3.14)$$

$$L = \frac{W_{TLC} L_{TLC}}{[(W_{TLC}^2) + (L_{TLC}^2)]} \quad (3.15)$$

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (3.16)$$

$$Ra_L = \frac{g \beta (\overline{T_w} - T_s) L^3}{\nu \alpha} \quad (3.17)$$

- โดยที่ Nu_L คือ ค่านัสเซิลด์นัมเบอร์ที่สูญเสียความร้อนแบบธรรมชาติบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล
- k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิ 25°C [W/(m²·K)]
- L คือ ค่าความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) ของพื้นผิว [m]
- W_{TLC} คือ ความกว้างของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลเท่ากับ 0.24 m
- L_{TLC} คือ ความยาวของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลเท่ากับ 0.24 m
- Ra_L คือ ค่า Rayleigh number
- Pr คือ ค่า Prandtl number
- g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก [m/s²]
- β คือ $1/(\overline{T_s} + 273)$ คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric thermal expansion coefficient, [K⁻¹])
- ν คือ ค่าความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity, [kg/(m·s)])
- α คือ ค่าความแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity, [m²/s])

ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉพาะจุดและค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} \quad (3.18)$$

$$\overline{\text{Nu}} = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (3.19)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\bar{h} = \frac{\dot{q}_{input} - \sigma \varepsilon_{TLC} (\bar{T}_w^4 - T_s^4) - h_c (\bar{T}_w - T_j)}{\bar{T}_w - T_j} \quad (3.20)$$

โดยที่ $\overline{\text{Nu}}$ คือ ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
 A คือ พื้นผิวที่แลกเปลี่ยนความร้อน [m^2]

สำหรับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแต่ละจุดของภาพ จะใช้วิเคราะห์อุณหภูมิแต่ละจุดของภาพได้ และเนื่องจากฟลักซ์ความร้อนบนผนังมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นสมการ (3.14) อุณหภูมิของแต่ละจุดภาพสามารถใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้

3.5.3 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

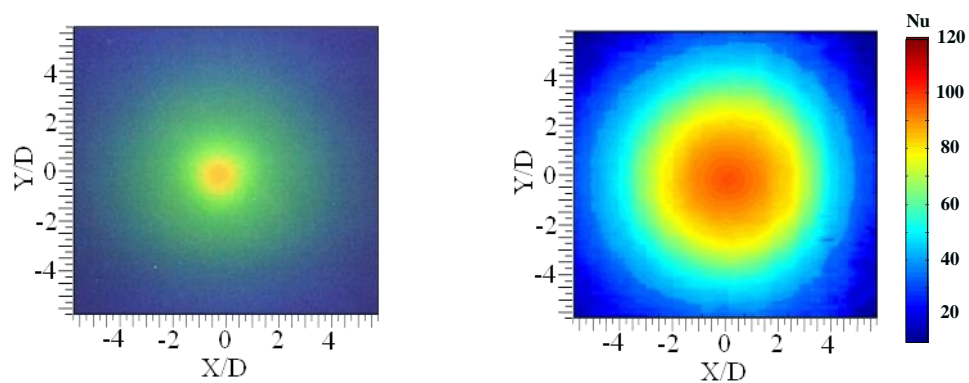
ในการหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน สามารถทำได้โดยนำรูปที่ได้จากการถ่ายภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลมาวิเคราะห์ประมวลผลโดยใช้โปรแกรมที่เขียนในโปรแกรม MATLAB ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพมีรายละเอียดดังนี้

- (1) เลือกรูปการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนคงที่ค่าหนึ่ง โดยภายในรูปต้องแสดงสีในช่วงอุณหภูมิ $29^\circ\text{C} \leq T \leq 46^\circ\text{C}$
- (2) โหลดไฟล์รูปถ่ายของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรม MATLAB
- (3) ตัดรูปให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์

(4) จะนำรูปมาแยกองค์ประกอบของสี R, G, B และเปลี่ยนข้อมูลสีเป็นระบบ H, S, I

(5) แทนค่าเฉลี่ย H ของแต่ละจุดภาพในสมการทำนายอุณหภูมิ (สมการที่ (3.11-3.12)) เพื่อหาข้อมูลการกระจายอุณหภูมิของแต่ละจุดภาพ

(6) ใช้ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิตั้งบนพื้นผิว คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยใช้ค่าตัวเลขตั้งนัมเบอร์ที่กระจายทั่วทั้งพื้นผิว และค่าเฉลี่ยที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (3.13)-(3.20)



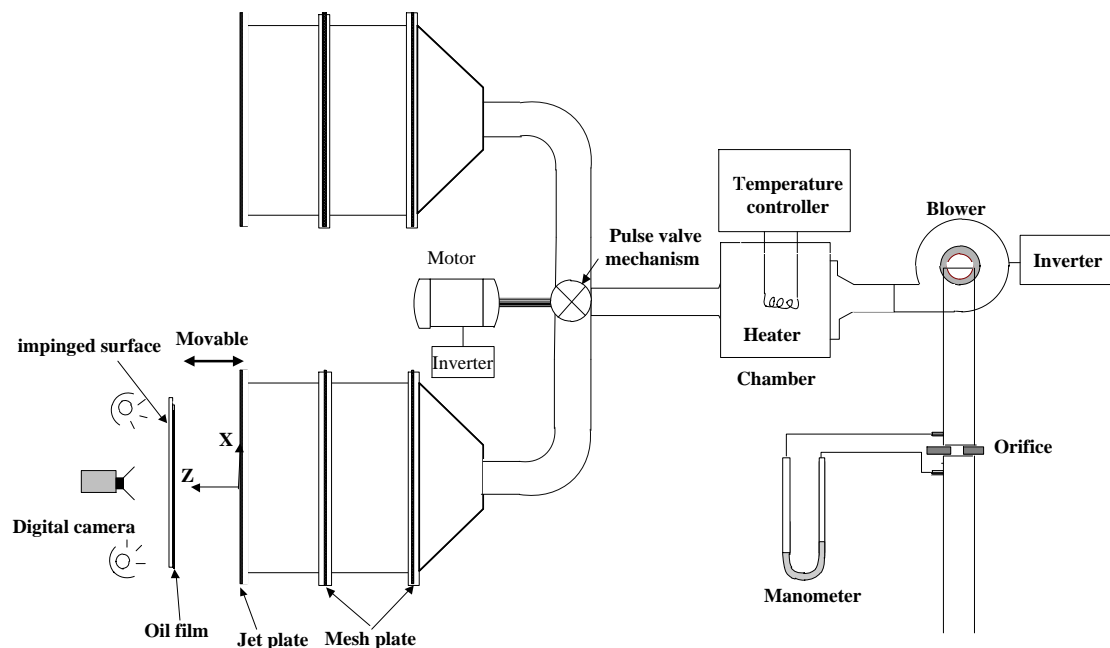
(ก) รูปถ่ายแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัล (ข) รูปการกระจายตัวของตัวเลขตั้งนัมเบอร์

รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างผลการหาการกระจายของตัวเลขตั้งนัมเบอร์ที่ได้จากการประมวลผลภาพด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ภาพของแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ โดยจะเลือกภาพเฉพาะบริเวณที่แผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลแสดงสีอยู่ในช่วง $29^{\circ}\text{C} \leq T \leq 46^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในรูป 3.12 (ก) หลังจากนั้นจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพโดยใช้ค่าฟลักซ์ความร้อนของรูปที่เลือกโดย ฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณจากสมการ (3.14) แล้ววิเคราะห์แต่ละจุดภาพของภาพถ่ายสีแผ่นเทอร์โมลิกวิดคริสตัลจะได้ภาพการกระจายตัวของตัวเลขตั้งนัมเบอร์โดยคำนวณจากสมการ (3.18) นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยและค่าตัวเลขตั้งนัมเบอร์เฉลี่ย สามารถคำนวณจากอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว

3.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยเทคนิคฟิล์มน้ำมัน (Oil film)

รูปที่ 3.13 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิวได้ใช้ชุดทดลองเดิมที่ใช้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวมาประยุกต์ใช้ โดยเปลี่ยนแผ่นที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งจากเดิมเป็นแผ่นสแตนเลสมาเป็นแผ่นพลาสติกใสและทาฟิล์มน้ำมัน บางๆบนแผ่นพลาสติกใสด้านที่เจ็ทพุ่งชนเมื่อเจ็ทไหลพุ่งชนฟิล์มน้ำมันก็จะเกิดการไหลบนพื้นผิว ทำให้สามารถเห็นลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวได้



รูปที่ 3.13 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศบนพื้นผิว

ในการทดลองได้นำแผ่นพลาสติกใสที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวทาคด้วยน้ำมันสีขาวที่มีส่วนผสมของพาราฟินแบบเหลวผงไททานเนียมไดออกไซด์และกรดโอเลอิกมีสัดส่วนการผสม 8:2:1 โดยน้ำหนัก โดยทาเป็นฟิล์มบาง ๆ ทั่วทั้งพื้นผิวจากนั้นจึงนำแผ่นพลาสติกใสมาติดตั้งเข้ากับชุดทดลองเป็นระนาบที่เจ็ทพุ่งชนสำหรับผนังของแผ่นเจ็ททาสีดำเพื่อให้สามารถสังเกตบริเวณที่เจ็ทพัดพาฟิล์มน้ำมันออกจากพื้นผิวได้ชัดเจนหลังจากที่เจ็ทเริ่มไหลพุ่งชนฟิล์มน้ำมันจะบันทึกภาพการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวจากด้านหลังของแผ่นพลาสติกใสโดยใช้กล้องดิจิทัลฉบับบันทึกการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มน้ำมันที่เวลาต่าง ๆ

3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของรูเจ็ท $D=16$ mm ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D, 4D, 6D, 8D$ ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D, 4D, 6D$ และความถี่ของเจ็ทคือ 0Hz, 4.5Hz, 9.25Hz, 19Hz, 28.5Hz โดยคำนวณเป็นค่าสโตวาเวลล์นัมเบอร์ $St=0.00, 0.0074, 0.0152, 0.0312, 0.0472$ ตามลำดับ (ตามสมการที่ 3.6) และในกรณีการทดลองเจ็ทลำเดียวจะใช้แผ่นเจาะรูเดี่ยวขนาด 16 mm ที่อยู่ตรงกลางเป็นหลักโดยนำมาเปลี่ยนแผ่นออริฟิศจาก 9 รู เหลือเพียงหนึ่งรูเท่านั้น

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง สำหรับตัวแปรระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เลือกใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง $L=2D-8D$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ทอยู่ในช่วง $S=2D-6D$ สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองได้เลือกค่าที่อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเพียงค่าเดียว เนื่องจากในงานวิจัยไม่ได้ศึกษาผลของตัวแปรเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ท

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (D)	16 mm
ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)	12,000
อุณหภูมิเจ็ท (T_j)	$27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
ความถี่ของเจ็ท (f)	0 Hz (St = 0) 4.5 Hz (St = 0.0074) 9.25 Hz (St = 0.0152) 19 Hz (St = 0.0312) 28.5 Hz (St = 0.0472)
ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน (L)	2D, 4D, 6D, 8D
ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S)	2D, 4D, 6D

บทที่ 4

การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) คือ การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาของพลศาสตร์ของไหล ซึ่งสามารถใช้จำลองการไหล การถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้ เป็นวิธีการที่นิยมอย่างกว้างขวางสำหรับวิศวกรและนักวิจัยที่จำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์การไหล เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถช่วยประหยัดเวลางบประมาณ สามารถแสดงให้เห็นพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนได้ทั้งหมดเมื่อเทียบกับการศึกษาด้วยวิธีเชิงทดลอง ในการแก้ปัญหาลักษณะการไหลด้วยการจำลองจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตและบริเวณที่จะศึกษาให้ชัดเจน สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานของการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล วิธีการและขั้นตอนการจำลองลักษณะการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.1 ทฤษฎีของการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

4.1.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์

CFD เป็นการแก้ปัญหาลักษณะการไหลที่สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ จากนั้นจะทำการแก้ปัญหาลักษณะการไหลเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณสำหรับหลักการแก้ปัญหาลักษณะการไหลด้วย CFD จะใช้วิธีแบบปริมาตรควบคุม (Control volume) และคิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของของไหลที่พื้นผิวเข้า-ออกของปริมาตรควบคุมแต่ละด้าน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของของไหลแต่ละด้านสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งจะเรียกว่า “สมการควบคุม (Governing equations)” สมการควบคุมที่ใช้ในการแก้ปัญหาลักษณะการไหลด้วย CFD ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์มวลและสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

สมการเชิงอนุพันธ์มวล

สมการเชิงอนุพันธ์มวล (Conservation of mass) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่อธิบายการไหลของมวล เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สมการต่อเนื่อง (Continuity equation) โดยที่ตัวแปรเหล่านั้นจะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหลซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_i) = S_m \quad (4.1)$$

โดยที่ u_i คือ ความเร็ว [m/s]
 S_m คือ มวลที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายของมวลหลักและแหล่งกำเนิดอื่น [27]

สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) เป็นสมการที่อธิบายจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่ได้มาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law) ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับความเร่ง เขียนเป็นสมการ โมเมนตัมในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (4.2)$$

โดยที่ P คือ ความดันสถิต (Static pressure, [N/m²])
 g_i คือ แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อมวล (Gravitational body force, [m/s²])
 F_i คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อมวล (External body force, [N])

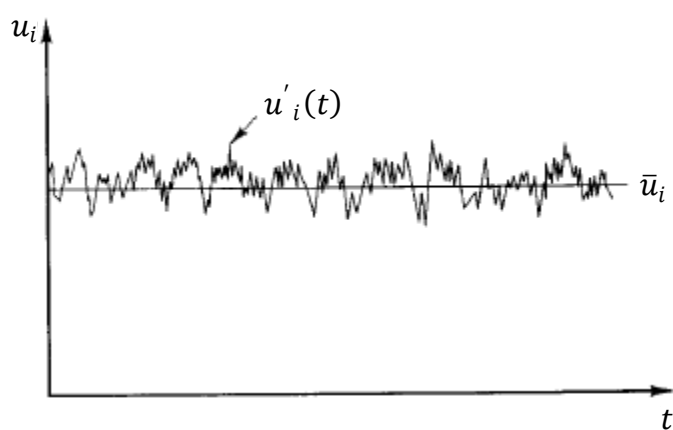
สมการ (4.2) เขียนในรูปแบบอนุพันธ์ (Conservation form) อธิบายได้ว่าผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม (อัตราการไหลเข้าออกสุทธิของโมเมนตัมเชิงเส้น) งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) จึงนำกฎของสโตกส์ (Stokes's law) ซึ่งความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stresses) เท่ากับผลคูณของอัตราความเครียด (Strain rates) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity coefficient) จะเรียกสมการที่ได้นี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation)

สมการที่กล่าวมาทั้งหมดทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการที่หาผลเฉลยยากทางคณิตศาสตร์ไม่ว่าจะเขียนระบบสมการย่อยเหล่านี้ในรูปแบบใดก็ตาม เพราะว่าเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Coupled partial differential equations) ผลลัพธ์ที่หาได้ต้องสอดคล้อง (Satisfy) กันทุกสมการพร้อมกัน และความยากอีกส่วนหนึ่ง คือ สมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear equations) เป็นการยากที่จะหาผลเฉลยที่เที่ยงตรงถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary

conditions) และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาจะง่ายก็ตาม จึงทำให้มีวิธีการแก้ปัญหของไหล ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการคำนวณ

4.1.2 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีความเร็วไม่สม่ำเสมอและมีทิศทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน โดยธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วน ความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลาและตำแหน่งดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน

การเปลี่ยนแปลงความเร็วสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t) \quad (4.3)$$

โดยที่ \bar{u}_i คือความเร็วเฉลี่ย (Time average velocity, [m/s])

u'_i คือความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด ๆ (Velocity fluctuation, [m/s])

จากสมการ (4.3) สามารถอธิบายได้ว่าความเร็วของของไหลสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่าเท่ากับความเร็วเฉลี่ย (Time-average velocity) บวกกับความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด (Fluctuation velocity) โดยค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง (Time-averaging, T) สามารถนิยามได้จากสมการ

$$\bar{u}_i(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i(x, t) dt \quad (4.4)$$

ซึ่งเมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะทำให้ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด ๆ นั้นมีค่าเป็นศูนย์ ($u'_i(x, t) = 0$) เช่นเดียวกันเมื่อทำการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งให้กับสมการอนุรักษ์เชิงมวลและสมการนาเวียร์-สโตกส์ จะได้ว่า

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

สมการที่ (4.6) นี้เรียกว่า Reynold-Averaged Navier-Stokes (RANS) สังเกตได้ว่าสมการที่ (4.6) มีเทอมของ $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ คือ ความเค้นเรย์โนลด์ ซึ่งเทอมนี้เป็นผลของการไหลปั่นป่วนทำให้ไม่สามารถแก้สมการเชิงอนุรักษ์ได้ เนื่องจากจำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองกึ่งทดลอง (Semi-empirical model) ของความปั่นป่วนมาช่วยในการคำนวณ ซึ่งในการเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนนี้ต้องขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ลักษณะทางฟิสิกส์ของการไหล ประเภทของปัญหาและระดับของความแม่นยำที่ต้องการ

4.1.3 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model)

ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$ model เนื่องจากเป็นแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่สามารถทำนายการไหลได้ถูกต้องและแม่นยำ และใช้หน่วยความจำและประมวลผลของคอมพิวเตอร์น้อย สำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน Realizable $k - \epsilon$ model ถูกพัฒนามาจากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ model

แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ [27]

แบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ เป็นแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่ง่ายและสมบูรณ์ที่สุดในการใช้ทำนายการไหล ซึ่งใช้สมการการเคลื่อนที่ในการคำนวณเพียง 2

สมการ คือ สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ปั่นป่วน และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการสลายปั่นป่วน แบบจำลองนี้ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม

สำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ เทอมความเค้นเรย์โนลด์ถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราความเค้นเฉลี่ย โดยความหนืดแบบปั่นป่วน (Eddy-viscosity) จะถูกกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, k) และอัตราการสลายปั่นป่วน (Dissipation rate, ϵ) โดยใช้สมมติฐานของ Boussinesq คือ

$$-\rho \overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.8)$$

โดยที่ μ_t คือความหนืดแบบปั่นป่วน (Eddy viscosity, [kg/(m·s)])
 k คือพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, [(kg·m²)/s²])
 ϵ คืออัตราการสลายแบบปั่นป่วน (Dissipation rate, [m²/s³])

จากสมการที่ (4.6), (4.7) และ (4.8) จึงเขียนความสัมพันธ์ของสมการที่ใช้จำลองการไหลแบบปั่นป่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4.9)$$

และ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4.10)$$

โดยที่ G_k คือ อัตราการเกิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฉลี่ย
 G_b คือ อัตราการเกิดความปั่นป่วนที่เกิดจากการลงค่า

- Y_M คือ ผลการขยายความผันผวนของอัตราการสลายปั่นป่วน
 σ_k คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน
 σ_ϵ คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายปั่นป่วน

โดยที่ค่า $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ϵ เป็นค่าคงที่มีค่าดังนี้ $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$

แบบจำลอง Realizable $k - \epsilon$ [27]

แบบจำลอง Realizable $k - \epsilon$ เป็นแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่พัฒนามาจากแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ แต่มีความแตกต่างกับแบบจำลองข้างต้น 2 ประการ คือ ประการแรกแบบจำลอง Realizable $k - \epsilon$ ได้มีสมการสำหรับความปั่นป่วนของความหนืด อีกประการ คือ สมการการเคลื่อนที่สำหรับอัตราสูญสลายแบบปั่นป่วนเขียนสมการขึ้นมาใหม่จากการสมการการเคลื่อนที่ของ Mean – square vorticity fluctuation ประโยชน์ที่ได้คือแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายได้แม่นยำมากขึ้นในการทำนายการไหลที่เกี่ยวข้องกับการหมุนวน การแยกตัวหรือการหมุนเวียน เป็นต้น ซึ่งแบบจำลอง Realizable $k - \epsilon$ ได้เปลี่ยนสมการการคำนวณความหนืดปั่นป่วน (4.12) ซึ่งแตกต่างออกไปจากแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ คือ

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2v_t \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_i) \cdot \Omega \quad (4.11)$$

$$v_t \equiv \mu_t / \rho \quad (4.12)$$

$$\frac{k}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_i) > \frac{1}{3C_\mu} \approx 3.7 \quad (4.13)$$

- โดยที่ $\overline{u^2}$ คือ ความเครียดเฉลี่ยตั้งฉาก (Normal mean stress, N/m²)
 v_t คือ ความเค้นเฉลี่ยของการไหล (Strain mean flow)

จากสมการที่ (4.11) ความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วนและอัตราการสลายแบบปั่นป่วนใหม่เป็นสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \\ + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (4.16)$$

จากแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ สมการในการคำนวณความหนืดปั่นป่วน คือ สมการที่ (4.8) และสามารถกำหนดค่า C_μ เป็นค่าคงที่ แต่ในแบบจำลอง Realizable $k - \epsilon$ ค่า C_μ นั้นไม่คงที่และคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k \mathbf{V}^*}{\epsilon}} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{V}^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (4.18)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k \quad (4.19)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - 2\epsilon_{ijk} \omega_k \quad (4.20)$$

โดยที่ Ω_{ij} คือ เมตริกของการหมุน และกำหนดค่าคงที่ A_0 และ A_s คือ

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (4.21)$$

โดยที่

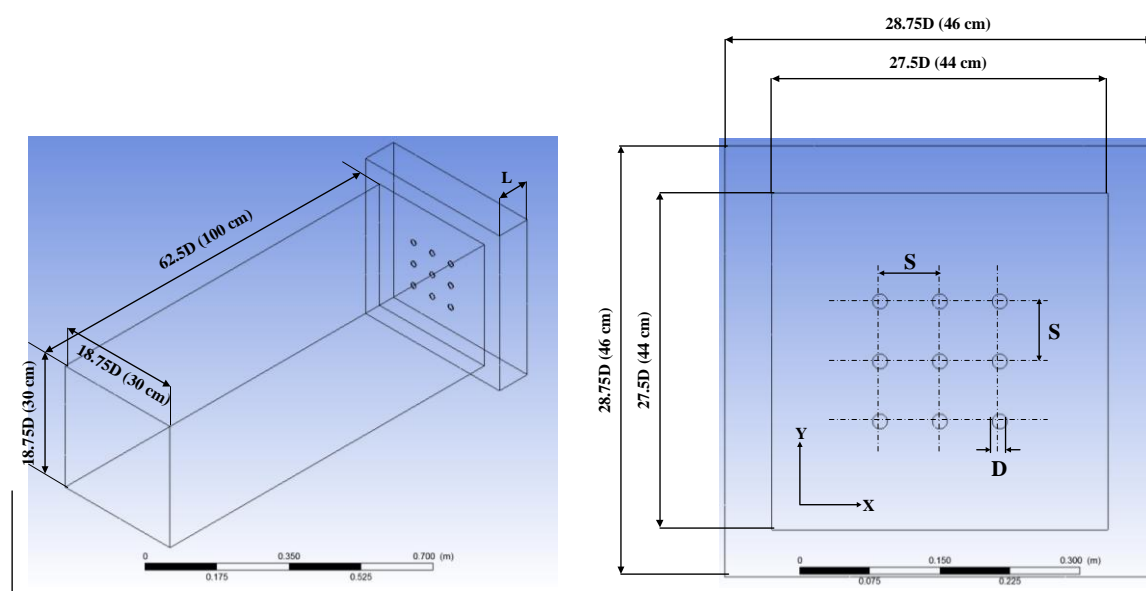
$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\bar{S}^3}, \quad \bar{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4.22)$$

โดยกำหนดค่าคงที่ต่าง ๆ ของสมการ คือ $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.2$

4.2 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

รูปที่ 4.2 แสดงรายละเอียดโมเดลที่ใช้ในแบบจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม ANSYS Ver.13, Fluent จากรูปโมเดลประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นห้องกักอากาศ (Jet chamber) มีขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ 30 cm x 30 cm x 100 cm และส่วนของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว มีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 46 x 46 x L โดยที่ L คือระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในส่วนที่ต่อกับห้องกักอากาศจะสร้างรูปทรงกระบอกสมมติให้เป็นความหนาของปากทางออกเจ็ท (ความหนาเท่ากับ 1.5 mm) โดยเจ็ทลำเดียวจะมีทรงกระบอกอยู่บริเวณตรงกลาง 1 กระบอก ส่วนกลุ่มของเจ็ทมีทรงกระบอกทั้งหมด 9 กระบอก และมีการจัดเรียงตัวของทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 4.2



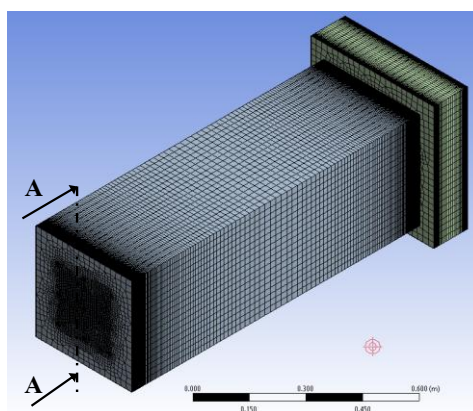
รูปที่ 4.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

4.3 ขั้นตอนการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

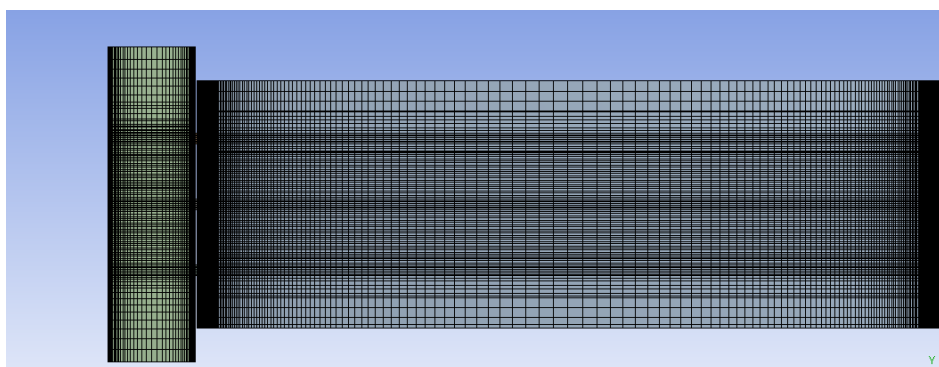
สำหรับวิธีการและขั้นตอนการการจำลองการไหลนั้นเริ่มจากสร้างแบบจำลองโมเดลของของไหลให้มีขนาดเท่ากับชุดทดลองจริง และขั้นตอนการสร้างกริด (Meshing) และกำหนดขอบเขตเงื่อนไข

4.3.1 การสร้างกริด (Meshing)

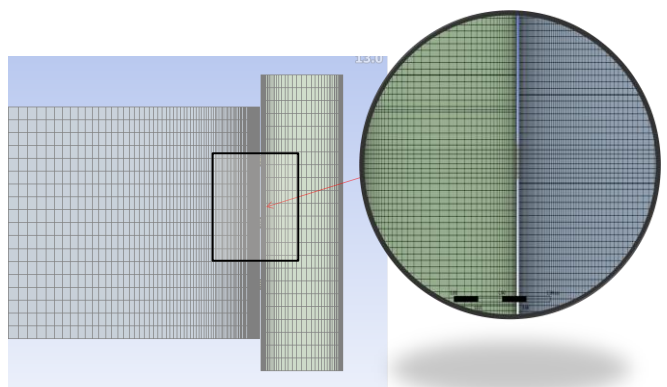
การสร้างกริด (Meshing) เป็นขั้นตอนต่อจากการสร้างโมเดล ซึ่งในรูปที่ 4.3-4.5 เป็นการแสดงรายละเอียดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4.3 แสดงรายละเอียดของการสร้างกริดในแบบจำลอง



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะกริดภายในของแบบจำลองการไหลบริเวณหน้าตัด A-A'

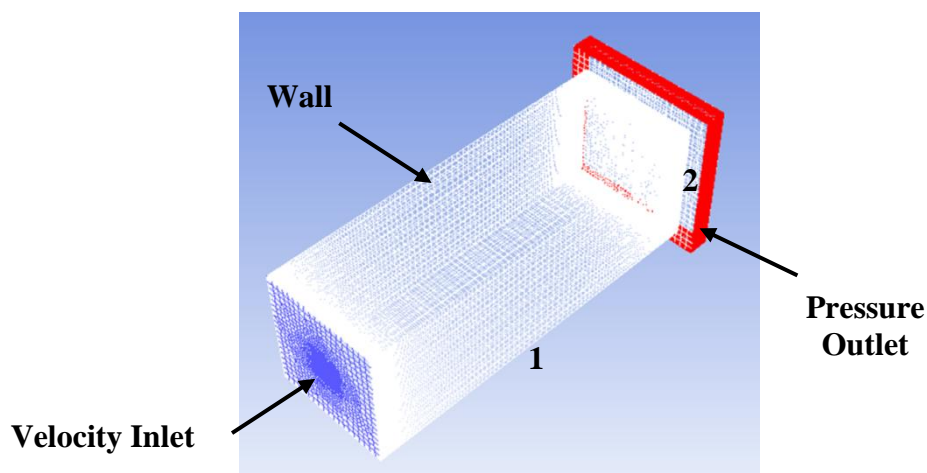


รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของกริดใกล้บริเวณปากทางออกของเจ็ท

กริดที่ใช้ในแบบจำลองจะมีลักษณะเป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยมผืนผ้า และทรงหลายเหลี่ยมผสมกัน รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะกริดของแบบจำลอง โดยด้านทงหน้าของห้องกักอากาศ และบริเวณตรงกลางมีความละเอียดสูงเนื่องจากการสร้างกริดบริเวณนี้เชื่อมโยงกับบริเวณที่ปากทางออกของเจ็ท และพื้นที่ผิวพุงชนซึ่งต้องการความละเอียดในการคำนวณสูงและบริเวณปากทางออกของเจ็ทและพื้นที่ผิวพุงชนมีลักษณะกริดเป็นชั้น ๆ ซึ่งมีความละเอียดสูงจากปลายทั้งสองข้าง และความละเอียดจะลดลงเมื่อห่างจากบริเวณปากทางออกของเจ็ทและพื้นที่ผิวที่เจ็ทพุงชน ในขั้นตอนการสร้างกริดนี้ จะกำหนดพื้นผิวของแบบจำลอง เพื่อสร้างเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ

4.3.2 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ (Boundary Condition)

ในการจำลองการไหลของเจ็ทที่ไหลพุงชนพื้นผิวแบบไหลต่อเนื่อง และแบบไหลเป็นจังหวะได้วิเคราะห์การไหลเป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient flow) ไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วง สำหรับโมเดลของความปั่นป่วนใช้แบบจำลอง Realizable $k - \epsilon$ โดยบริเวณที่ใกล้พื้นผิวกำหนดให้ใช้แบบ Non-Equilibrium wall functions



รูปที่ 4.6 การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของการไหล

จากรูปที่ 4.6 การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของการไหล แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 (สีน้ำเงิน) คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางเข้าของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางเข้าในรูปของความเร็วของการไหล (Velocity inlet) ส่วนที่ 2 (สีขาว) คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นผนังของการไหล ซึ่งพื้นที่ที่ถูกกำหนดจะอยู่ในส่วนของผนังของอุโมงค์ลม (หมายเลข 1) และพื้นที่ผิวที่เจ็ทพุ่งชน (หมายเลข 2) ส่วนที่ 3 (สีแดง) คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางออกของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางออกในรูปแบบของความดันที่ทางออกของการไหล (Pressure outlet)

การกำหนดเงื่อนไขของผนังของการไหลความดันทางออก และความเร็วได้กำหนดดังนี้

เงื่อนไขของผนังของการไหล

- กำหนดให้ผนังไม่มีการไหล และไม่มีการเคลื่อนที่เงื่อนไขของความดันทางออก
- กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจมีค่าเท่ากับ 0 Pa)

เงื่อนไขของความเร็วทางเข้า

- กำหนดความเร็วทางเข้าของการไหลมีค่าคงที่กรณีการไหลแบบต่อเนื่อง
- กำหนดความเร็วทางเข้าของการไหลมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา ซึ่งสามารถกำหนดในรูปแบบของ User-defined function (UDF) กรณีการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ

การจำลองการไหลในการทดลองครั้งนี้ได้กำหนดความเร็วของไหลทั้ง 2 ลักษณะ โดยในการจำลองการไหลกรณีเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง กำหนดให้ความเร็วของการไหลมีค่าเท่ากับ 0.013 m/s กรณีเจ็ทลำเดียว และค่าเท่ากับ 0.11 m/s กรณีเจ็ทกลุ่ม เพื่อให้ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ท มีค่าเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง และในการจำลองการไหลกรณีเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ กำหนดให้ความเร็วของการไหลมีค่าตามตารางที่ 4.1 ซึ่งความเร็วของการไหลมาจากผลการสร้างเส้นโค้งของผลการทดลองที่ปากทางออกเจ็ท โดยที่ W_{inlet} คือ ความเร็วทางเข้าห้องกักอากาศ และ t คือ เวลาของการไหลที่เวลาใด ๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงการกำหนดความเร็วในกรณีเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะ

ความถี่การสั้นของเจ็ท	ความเร็วในแบบจำลองการไหล
$f = 4.5$ Hz (กรณีเจ็ทลำเดียว)	$W_{inlet} = 0.013 + 0.011 \sin(28.27t)$
$f = 9.25$ Hz (กรณีเจ็ทลำเดียว)	$W_{inlet} = 0.013 + 0.009 \sin(58.12t)$
$f = 19$ Hz (กรณีเจ็ทลำเดียว)	$W_{inlet} = 0.013 + 0.004 \sin(117.81t)$
$f = 28.5$ Hz (กรณีเจ็ทลำเดียว)	$W_{inlet} = 0.013 + 0.002 \sin(172.21t)$
$f = 4.5$ Hz (กรณีเจ็ทกลุ่ม)	$W_{inlet} = 0.11 + 0.1 \sin(28.27t)$
$f = 9.25$ Hz (กรณีเจ็ทกลุ่ม)	$W_{inlet} = 0.11 + 0.09 \sin(58.12t)$
$f = 19$ Hz (กรณีเจ็ทกลุ่ม)	$W_{inlet} = 0.11 + 0.07 \sin(117.81t)$
$f = 28.5$ Hz (กรณีเจ็ทกลุ่ม)	$W_{inlet} = 0.11 + 0.06 \sin(172.21t)$

4.3.3 การคำนวณ

สำหรับวิธีการคำนวณ ได้กำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยรายละเอียดของ Spatial discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ในการคำนวณกำหนดตามตารางที่ 4.2 โดยกำหนดเงื่อนไขในการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ 1×10^{-4}

ตารางที่ 4.2 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization [27]

Scheme	SIMPLE
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order Upwind
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind
Transient Formulation	Second Order Implicit

บทที่ 5

ผลการศึกษา

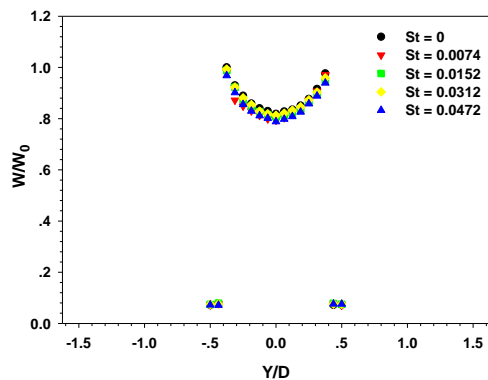
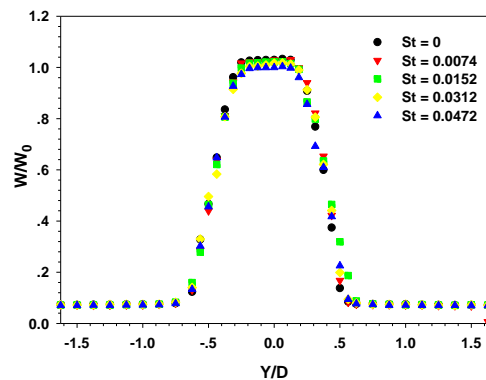
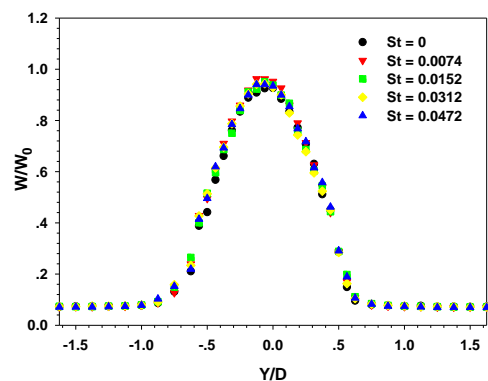
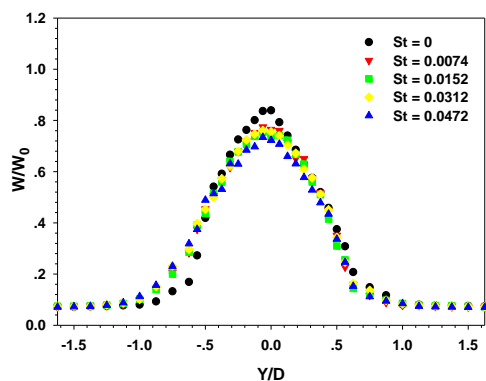
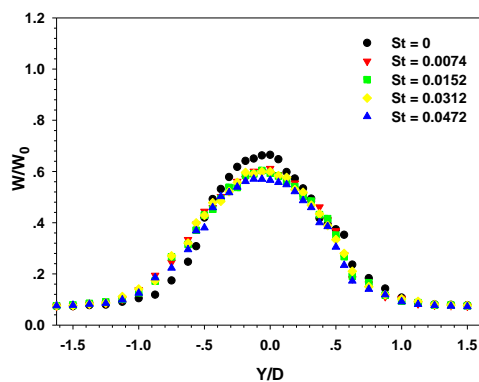
ในบทนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะอธิบายเกี่ยวกับผลของการศึกษากรณีของเจ็ทลำเดี่ยว และในส่วนที่สองจะอธิบายผลของกลุ่มเจ็ท โดยในรายละเอียดของแต่ละส่วนจะอธิบายเกี่ยวกับการกระจายความเร็วและความปั่นป่วน ลักษณะการไหลของเจ็ทและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และสุดท้ายจะแสดงค่าน้ำเสียดันน์เบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว

5.1 ลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดี่ยว

5.1.1 การกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทลำเดี่ยว

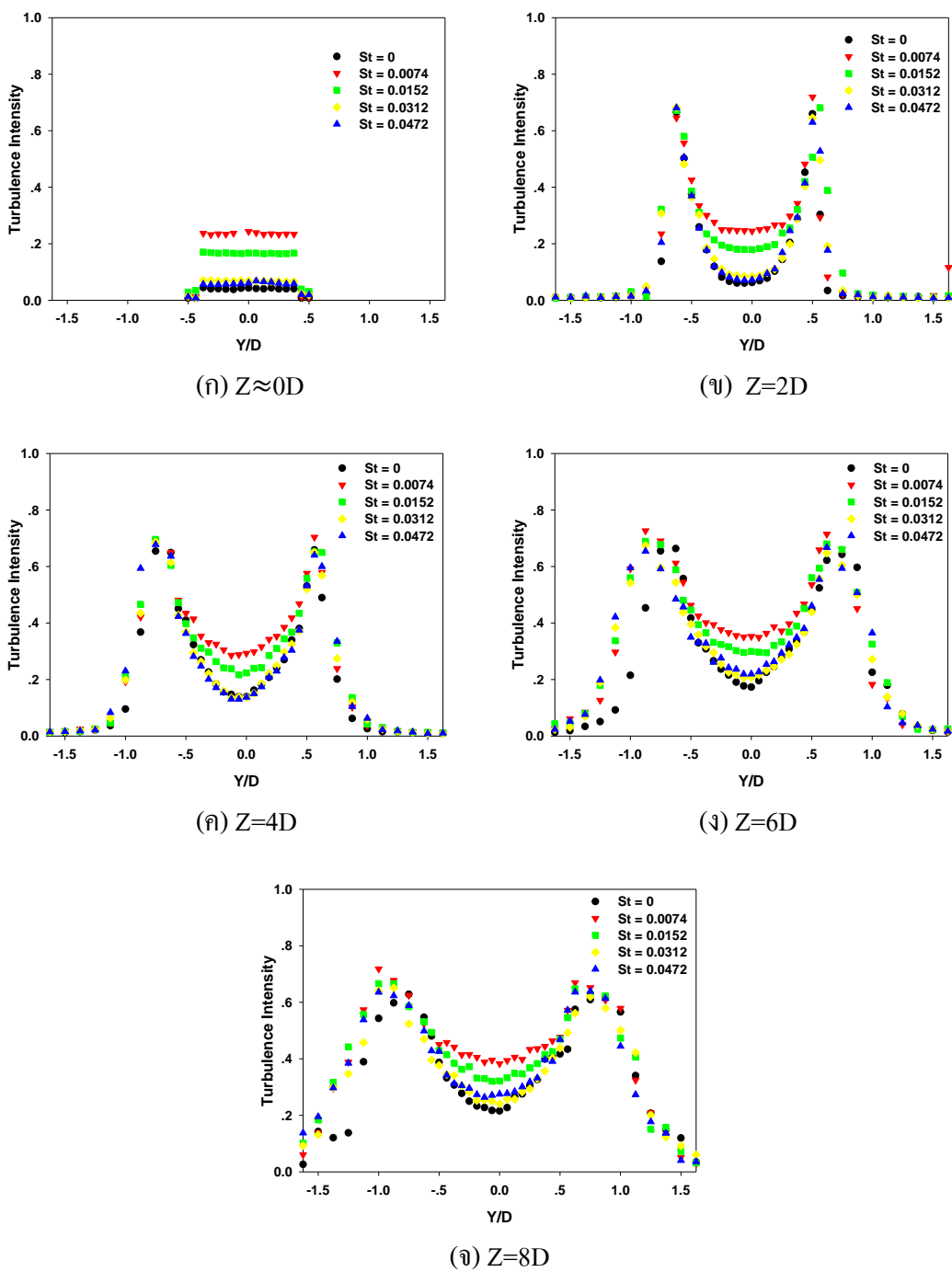
รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวรัศมีที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทตามแนวแกน Z ต่าง ๆ จากรูปที่ 5.1 โดยภาพรวมพบว่าการกระจายความเร็วเจ็ทที่แกน Z ต่าง ๆ ระหว่างเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องและไหลแบบเป็นจังหวะแตกต่างกันไม่มากนัก สำหรับที่ระยะ $Z \approx 0D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1(ก) พบว่าการกระจายของความเร็วเจ็ทมีค่าสูงที่ขอบออริฟิส ($Y = \pm 0.5D$) และมีค่าลดลงเมื่อระยะเข้าใกล้ศูนย์กลางออริฟิส สำหรับที่ตำแหน่ง $Z = 2D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1(ข) พบว่าการกระจายของความเร็วเจ็ทมีค่าสูงและเกือบคงที่ในช่วงตำแหน่ง $-0.3D \leq Y \leq 0.3D$ จากนั้นความเร็วเจ็ทมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนเกือบเท่ากับศูนย์ใกล้ตำแหน่งบริเวณขอบออริฟิส ($Y = \pm 0.5D$) เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทเพิ่มขึ้นเป็น $Z = 4D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1(ค) พบว่าความเร็วเจ็ทในตำแหน่งศูนย์กลางออริฟิสมีค่าสูงสุดและการกระจายของความเร็วเจ็ทขยายตัวเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีเมื่อเทียบกับที่ระยะ $Z = 2D$ แต่ขนาดของความเร็วสูงสุดจะลดลงเมื่อเทียบกับที่ระยะ $Z = 2D$ และความเร็วเจ็ทที่ตำแหน่งศูนย์กลางออริฟิสมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและขยายตัวในแนวรัศมีเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทเพิ่มขึ้นเป็น $Z = 6D$ และ $8D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1(ง) และ (จ) ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงลักษณะทั่วไปที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การไหลของเจ็ทที่มีการผสมกับอากาศรอบๆ ทำให้การขยายตัวในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท ซึ่งมีผลทำให้ความเร็วศูนย์กลางลดลงอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่ง $Z > 4D$ ตามที่ได้แสดงรูปที่ 5.3(ก) นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ตำแหน่งศูนย์กลางออริฟิสตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.1(ง) และ (จ) นั้น ความเร็วของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะมีขนาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง และแนวโน้มการกระจายความเร็วเจ็ทในแนวรัศมีกรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะมีการขยายตัวมากกว่าเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง

(ก) $Z \approx 0D$ (ข) $Z = 2D$ (ค) $Z = 4D$ (ง) $Z = 6D$ (จ) $Z = 8D$

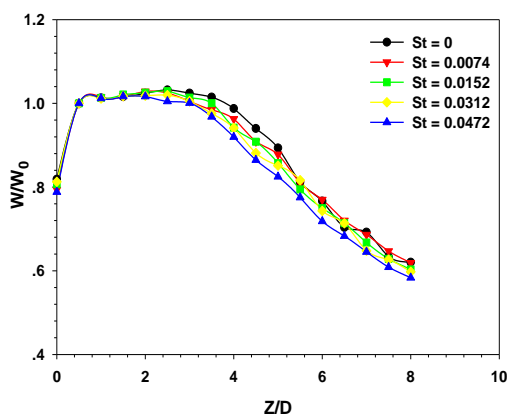
รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทลำเดียวตามแนวแกน Y

($\overline{W_0} = 12.1 \text{ m/s}$, $Re = 12,000$)

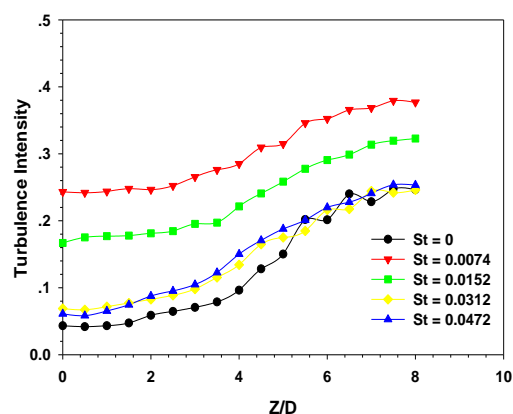


รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะความปั่นป่วนของเจ็ทลำเดียวที่กระจายตามแนวแกน Y

$$(\overline{W_0}=12.1 \text{ m/s, Re}=12,000)$$



(ก) การกระจายความเร็วเจ็ท



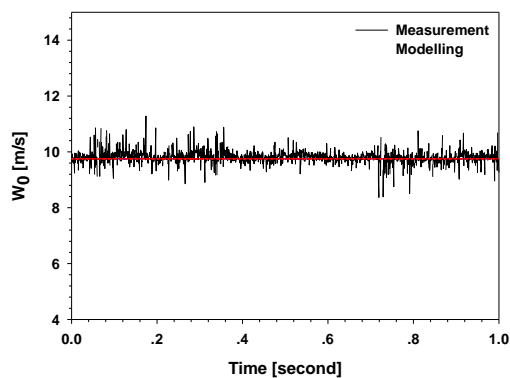
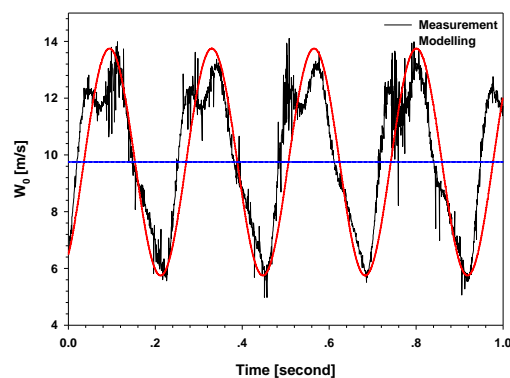
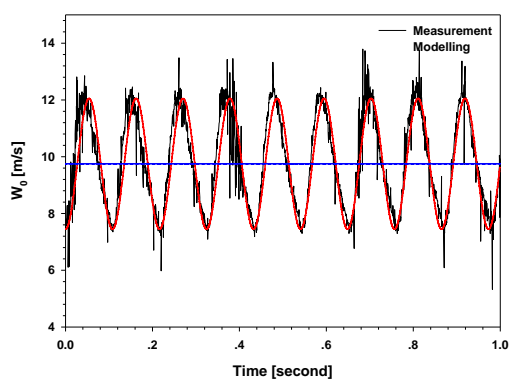
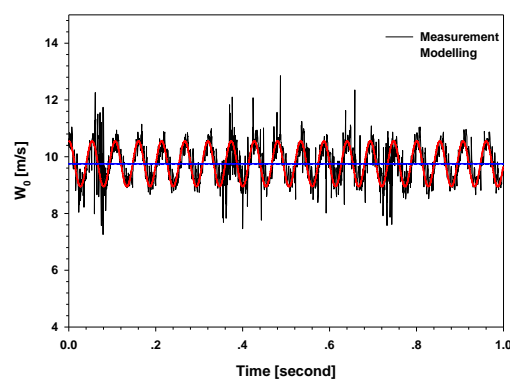
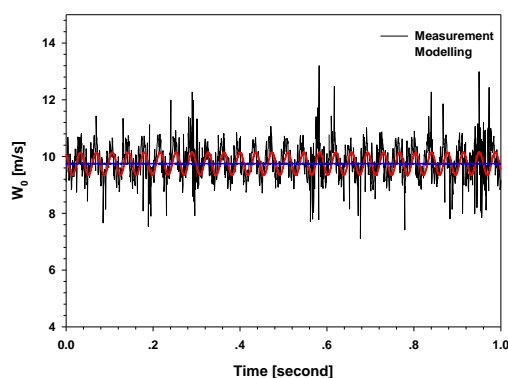
(ข) การกระจายของความปั่นป่วน

รูปที่ 5.3 แสดงการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทลำเดียวตามแนวแกน Z ($\bar{W}_0=12.1$ m/s, $Re=12,000$)

สำหรับการกระจายของความปั่นป่วนที่ระยะ $Z \approx 0D$ (รูปที่ 5.2(ก)) พบว่า ความปั่นป่วนมีค่าเกือบคงที่ ที่เงื่อนไขเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องมีค่าความปั่นป่วนต่ำสุด และค่าความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้นเมื่อสโตวฮาวล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไข $St=0.0074$ การกระจายของความปั่นป่วนมีค่าสูงสุด

สำหรับที่ระยะ $Z \geq 2D$ ตามที่แสดงในรูปที่ 5.2(ข)-(จ) พบว่าลักษณะการกระจายของความปั่นป่วนมีค่าสูงใกล้เคียงกับตำแหน่งขอบออร์ฟิส ($Y = \pm 0.5D$) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวนี้ เจ็ทเกิดการเชื่อมกับของไหลรอบๆ อย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณที่มีความปั่นป่วนสูงเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางของแกน Y เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิว (Z) เพิ่มขึ้น

สำหรับความปั่นป่วนตามแนวศูนย์กลางของเจ็ทได้เพิ่มขึ้นเมื่อระยะ $Z > 4D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.3(ข) ลักษณะการกระจายของความปั่นป่วนตามแนวศูนย์กลางเจ็ทสอดคล้องกับการกระจายความเร็วตามแนวศูนย์กลางเจ็ทดังแสดงในรูป 5.4(ก) ลักษณะการกระจายของความเร็วทั้งสองกรณีเกือบคงที่ในช่วง $0D < Z < 4D$ จากนั้นการกระจายของความเร็วจะลดลงและการกระจายของความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะ Z เพิ่มขึ้น โดยที่ความปั่นป่วนตามแนวศูนย์กลางเจ็ทที่เงื่อนไข $St=0.0074$ มีค่าสูงสุด และแนวโน้มของความปั่นป่วนมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าสโตวฮาวล์นัมเบอร์

(ก) $St=0$ ($f=0$ Hz)(ข) $St=0.0074$ ($f=4.5$ Hz)(ค) $St=0.0152$ ($f=9.25$ Hz)(ง) $St=0.0312$ ($f=19$ Hz)(จ) $St=0.0472$ ($f=28.5$ Hz)

รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทลำเดียวที่ปากทางออกเจ็ท ($Z \approx 0D$)

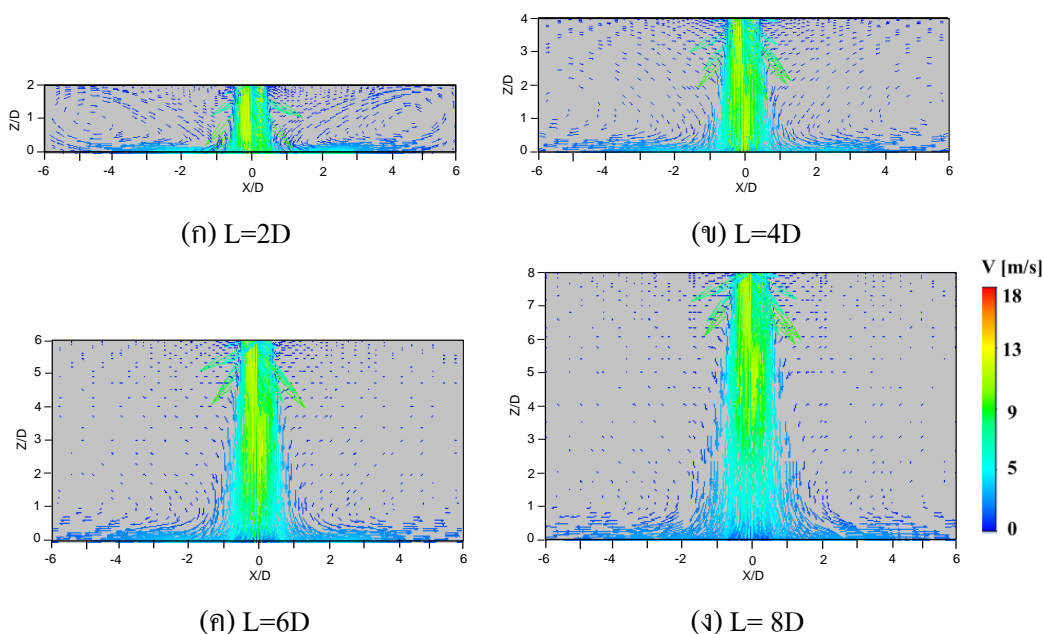
$$(\overline{W_0}=12.1 \text{ m/s}, Re=12,000)$$

รูปที่ 5.4 แสดงผลจากการวิเคราะห์ความถี่ต่อช่วงเวลาของการไหลเป็นจังหวะที่ปากทางออกเจ็ท ($Z \approx 0D$) โดยใช้ FFT จากรูปพบว่า กรณิของเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่องตามที่ได้แสดง

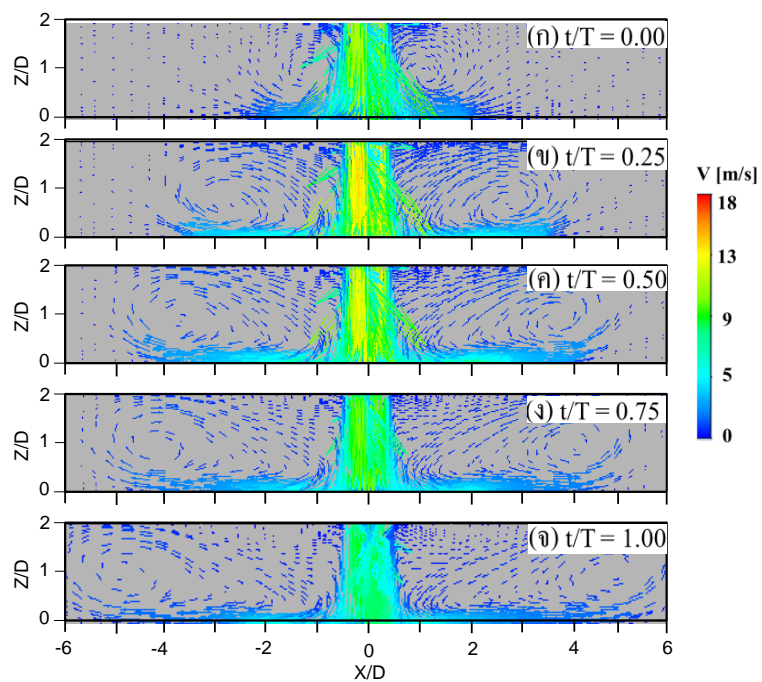
ในรูปที่ 5.4(ก) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมีค่าน้อยมาก (เชิงเส้น) สำหรับในกรณีของ เจ็ทไหลแบบจ้วงหว่าพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเจ็ทเป็นรูปคลื่น โดยความถี่ของจำนวน คลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อสโตวาฮาล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น และขนาดของความเร็วสูงสุดของรูปคลื่น (ยอดคลื่น) เพิ่มขึ้นเมื่อสโตวาฮาล์นัมเบอร์ลดลง

5.1.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ได้จากการจำลองการไหลโดยใช้ CFD ของเจ็ทลำเดียว

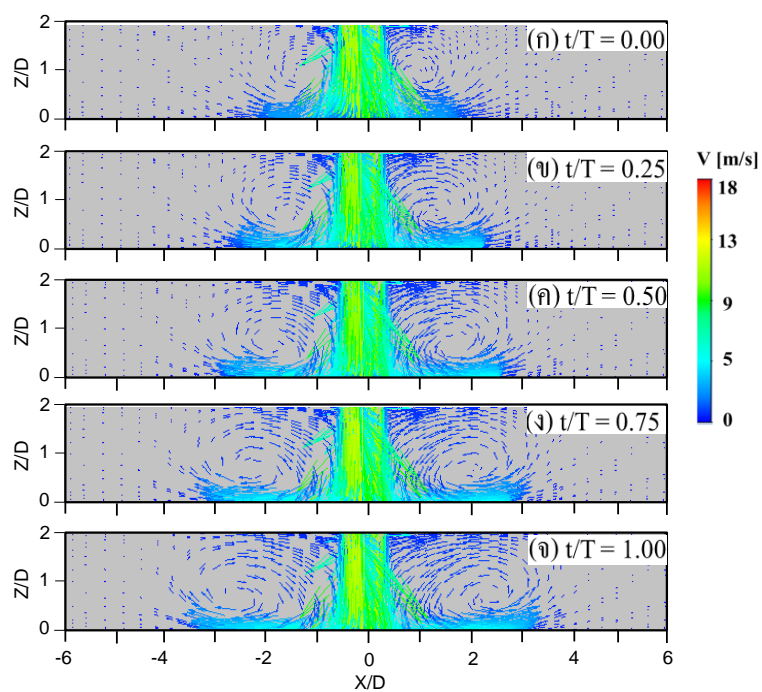
รูปที่ 5.5 แสดงผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ต่างๆ จากรูปพบว่า เจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิวจะไหลเรียบไปตามผนัง โดยที่ระยะจากปากทางออก เจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $L=2D$ (รูปที่ 5.5(ก)) จะเกิดการม้วนตัวของเจ็ทผนังไหลเป็นกระแสมุมวนวนเข้ามาผสมกับเจ็ท เนื่องจากผนังทั้งสองอยู่ในช่วงที่แคบทำให้การไหลบนผนังเกิดการม้วน ตัวเข้ามาผสมกับกระแสเจ็ทมาก สำหรับที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้นเป็น $L=4D$ (รูปที่ 5.5(ข)) พบว่ากระแสมุมวนวนดังกล่าวมีขนาดเพิ่มขึ้นและการเข้ามาผสมกับกระแสเจ็ท ทำได้น้อยลง สำหรับที่ระยะ $L=6D$ และ $8D$ พบว่า กระแสมุมวนวนดังกล่าวไม่ปรากฏ



รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทไหลแบบ ต่อเนื่อง ($St=0$, $Re=12,000$)



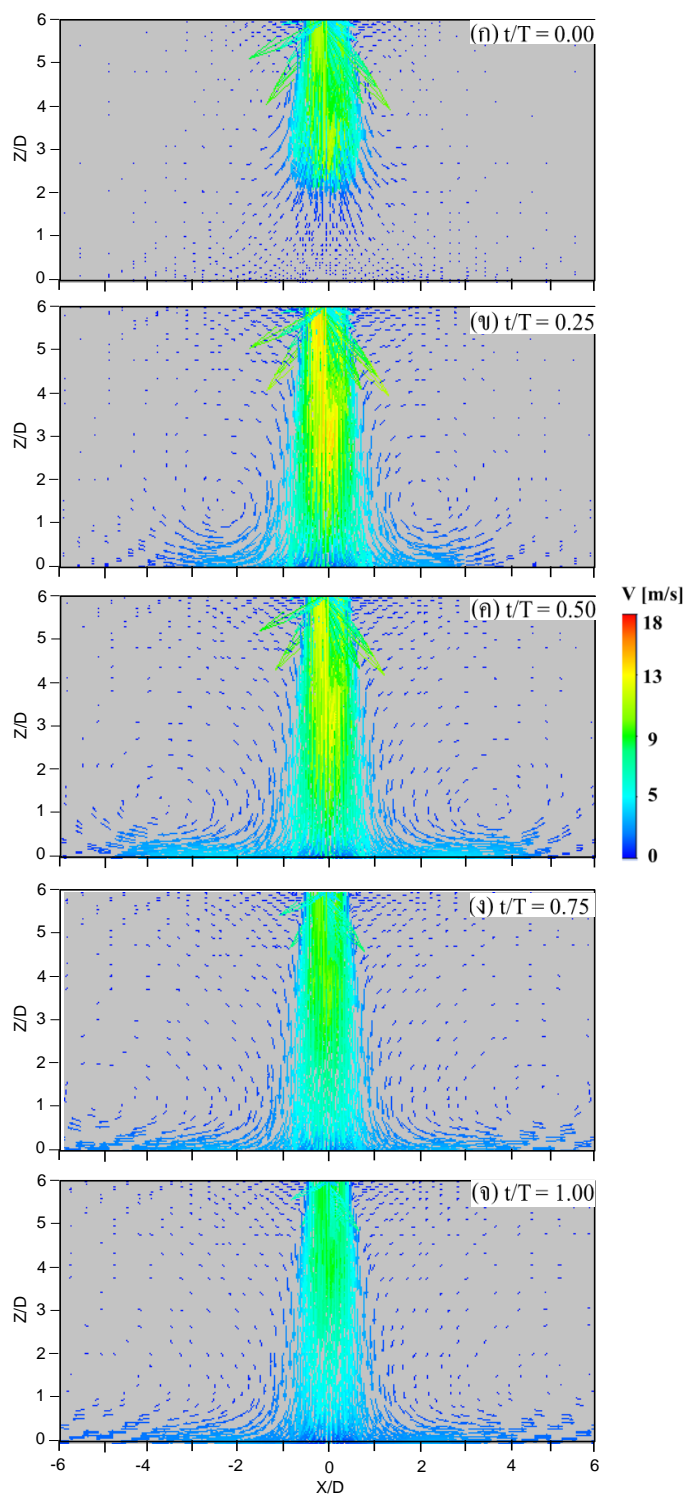
รูปที่ 5.6 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่ถี่เกินไป $St=0.0074$ ระยะ $L=2D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)



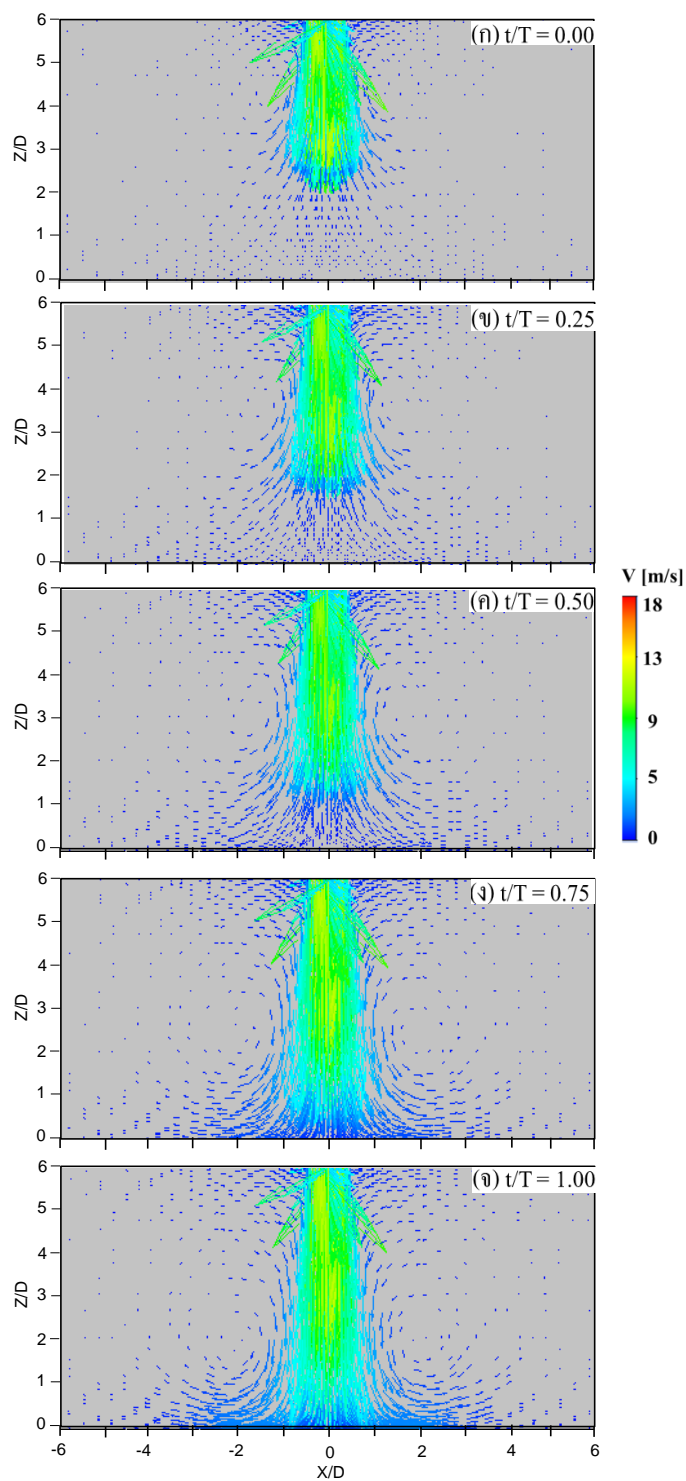
รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่ถี่เกินไป $St=0.0472$ ระยะ $L=2D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)

รูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ ที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0074$ และ 0.0472 ตามลำดับ จากรูปพบว่า เจ็ทหลังจากที่พุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดกระแสหมุนวนของเจ็ทผนังคล้ายกับที่เกิดขึ้นในลักษณะการไหลของเจ็ทแบบต่อเนื่องตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.5(ก) โดยจุดหมุนวนของกระแสหมุนวนจะเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางแนวรัศมีของเจ็ท เมื่อ t/T เพิ่มขึ้น โดยจุดศูนย์กลางของกระแสหมุนวนกรณีที่เงื่อนไข $St=0.0472$ (รูปที่ 5.7) เกิดขึ้นใกล้ตำแหน่งศูนย์กลางเจ็ทมากกว่าที่เงื่อนไข $St=0.0074$ (รูปที่ 5.6) สำหรับเวกเตอร์ที่แสดงการไหลพุ่งชนพื้นผิวของเจ็ท (เวกเตอร์สีเหลือง) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีความแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากอยู่ในช่วงเงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนค่าการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ที่พุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ เกิดขึ้นได้น้อย

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=6D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.8 และ 5.9 สำหรับที่เงื่อนไข $St=0.0074$ และ 0.0472 ตามลำดับ พบว่า ผลของการไหลเป็นจังหวะของเจ็ทสามารถสังเกตได้ชัดเจนขึ้น เนื่องจากระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วงที่สูง ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของเจ็ทที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้ดี โดยเฉพาะที่เงื่อนไข $St=0.0472$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าเวกเตอร์ที่แสดงเจ็ทมีความเร็วสูง (สีเหลือง) เลื่อนตำแหน่งใกล้พื้นผิว เมื่อ t/T เพิ่มขึ้น



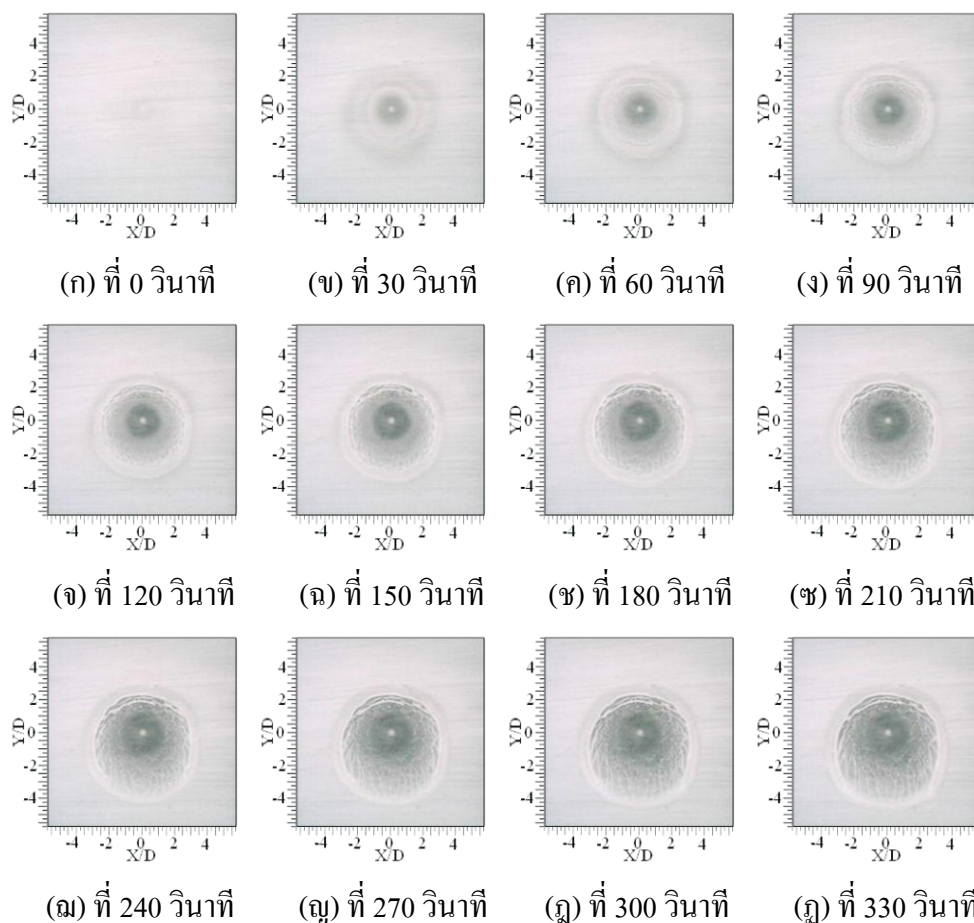
รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่สั่นไหว $St=0.0074$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)



รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่สั่นไหว $St=0.0472$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)

5.1.3 ลักษณะการไหลบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว

- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว
- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม



รูปที่ 5.10 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)

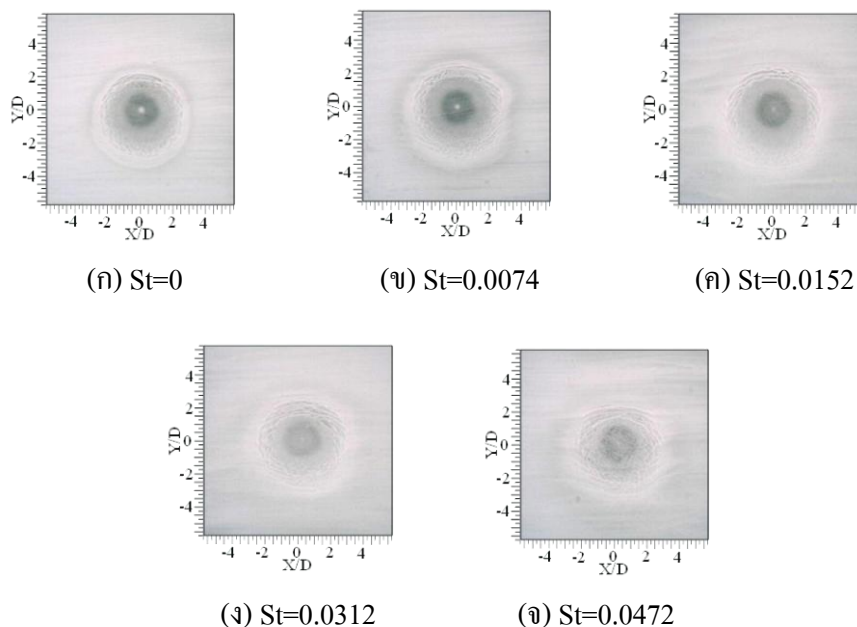
รูปที่ 5.10 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ โดยเปรียบเทียบที่ระยะเวลาต่าง ๆ บริเวณสีขาวเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม และบริเวณสีดำเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว จากรูปพบว่า ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะเห็นจุดสีขาวของน้ำมันที่สะสมอยู่ สำหรับบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement region) เป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูก

เจ็ทพัดพาออกไปรอบๆ (บริเวณที่เป็นสีดำไม่มีน้ำมันเกาะติด) เนื่องจากการไหลบนพื้นผิวมีความเร็วเกิดขึ้นและมีความเค้นเฉือนบนพื้นผิวที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบนพื้นผิว ในบริเวณดังกล่าวฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสีขาวสลับสีดำ)

รูปที่ 5.11 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ ระยะเวลาหลังพุ่งชน 150 วินาที โดยเปรียบเทียบที่สโตวฮาวล์นัมเบอร์ต่าง ๆ จากรูปพบว่า ลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณี $St=0.0074$ (รูปที่ 5.11(ข)) เหมือนกับลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันในกรณี $St=0$ (รูปที่ 5.11(ก)) โดยบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออก (บริเวณที่เป็นสีดำ) ของทั้งสองกรณีมีขนาดใกล้เคียงกัน สำหรับในกรณีที่ $St \geq 0.0152$ พบว่าบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกมีขนาดแคบลงเมื่อสโตวฮาวล์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

■ บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว

■ บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม



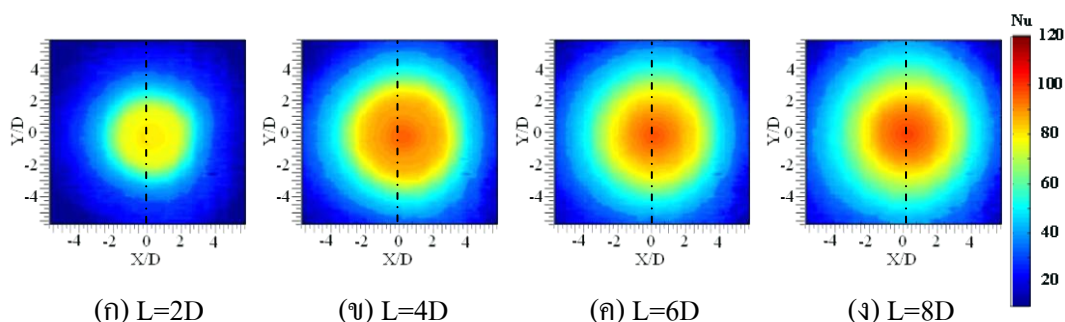
รูปที่ 5.11 แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่ระยะ $L=2D$ ระยะเวลาหลังจากเจ็ทพุ่งชน 150 วินาที ($Re=12,000$)

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกที่เงื่อนไข $St=0.0074$ มีขนาดใกล้เคียงกับ $St=0$ นั้น เกิดจากความเร็วสูงสุดของการไหล (ยอดคลื่น) ตามที่แสดงในรูปที่ 5.4 ที่เงื่อนไข $St=0.0074$ มีความเร็วของการไหลสูงกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ ($L=2D$) ขนาดของความเร็วสูงสุดของการไหลเป็นจังหวะมีผลต่อการพัดฟิล์มน้ำมันให้ไหลออกจากบริเวณที่เจ็ทชน

5.2 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชน

ในตอนต้นของหัวข้อนี้จะอธิบายถึง ผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง จากนั้นจะเปรียบเทียบการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ระหว่างเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องและไหลแบบเป็นจังหวะ ที่เงื่อนไขสโตวาฮาล์นัมเบอร์ต่าง ๆ สำหรับในตอนท้ายของหัวข้อจะเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว

5.2.1 ผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง

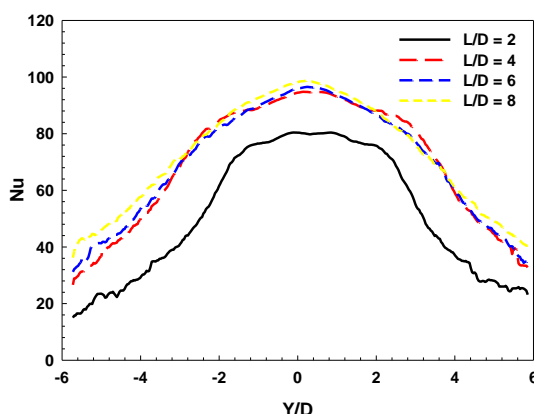


รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชน กรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($Re=12,000$)

รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง และรูปที่ 5.13 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน(จากเส้นประในรูปที่ 5.12) โดยภาพรวมของผลการทดลองพบว่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แล้วค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมี ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงอยู่ในช่วง $-2 < r/D < 2$ ซึ่งบริเวณที่นัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงมีพื้นที่แคบกว่าเมื่อเทียบกับที่ระยะ

$L \geq 4D$ เนื่องจากอยู่ในช่วงระยะปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ เจ็ทมีการขยายตัวได้น้อยกว่าที่ระยะปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง

สำหรับที่ระยะปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L \geq 4D$ การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์สูงกว่าที่ระยะ $L=2D$ อย่างเห็นได้ชัด โดยบริเวณที่นัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงอยู่ในช่วง $-3 < r/D < 3$ ซึ่งกว้างกว่าที่ระยะ $L=2D$ เนื่องจากเป็นช่วงที่เจ็ทเกิดการขยายตัวได้มาก สำหรับที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point, $r/D=0$) พบว่า ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=8D$ มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุด โดยนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ตำแหน่งนี้มีค่าลดลงตามการลดลงของระยะ L ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายของความปั่นป่วนตามแนวศูนย์กลางของเจ็ทตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.3(ข)

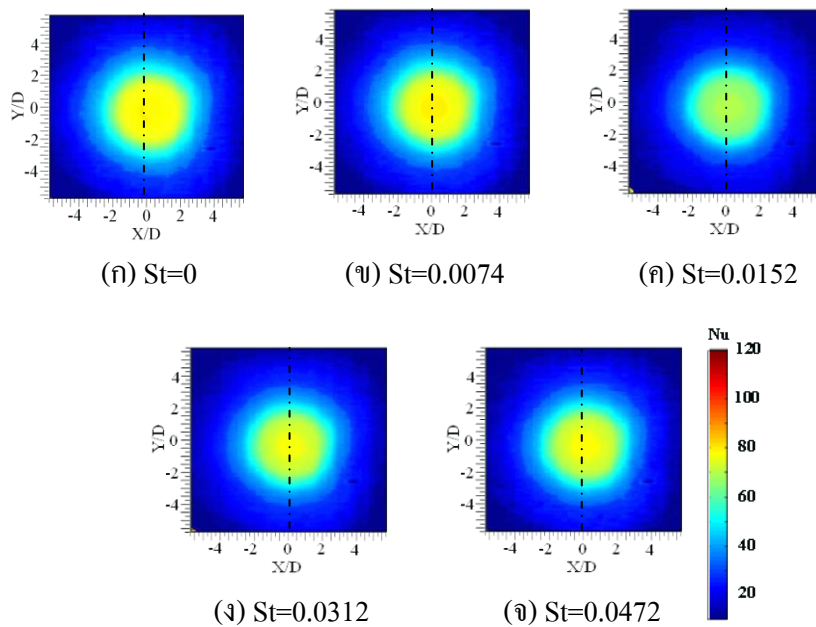


รูปที่ 5.13 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง (จากเส้นประในรูปที่ 5.12, $Re=12,000$)

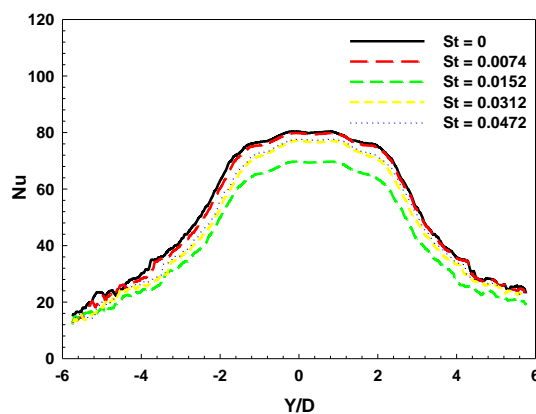
5.2.2 ผลของความถี่ของเจ็ทที่มีผลต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียว

รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ และรูปที่ 5.14 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (จากเส้นประในรูปที่ 5.14) จากรูปพบว่า การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์กรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($St=0$) และเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่ถี่ $St=0.0074$ มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับที่ถี่ของไซโคลฮาล์นัมเบอร์อื่นๆพบว่า การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าต่ำกว่าสองกรณีแรก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยวิธีฟิล์มน้ำมันตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.11 คือ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนกรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($St=0$) และเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่ถี่ $St=0.0074$ มีขนาดใกล้เคียงกัน สำหรับ

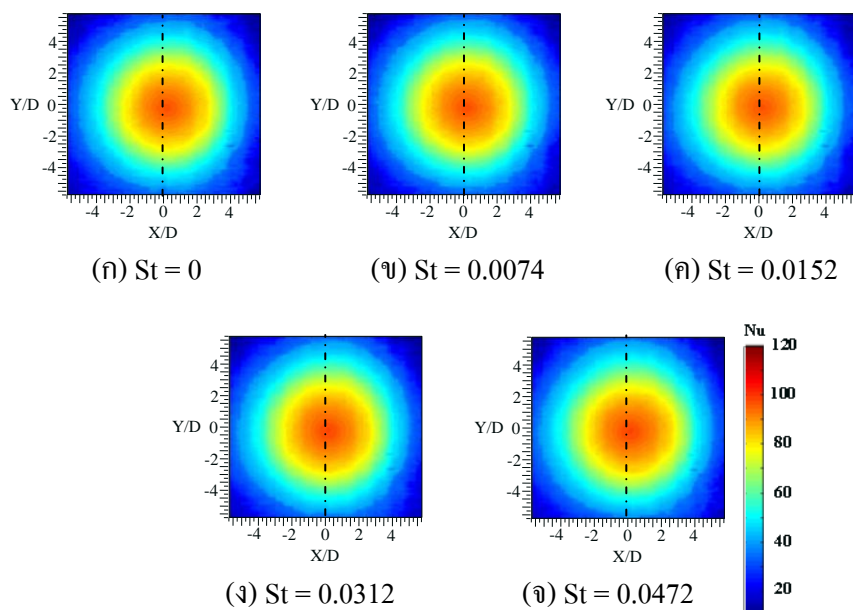
บริเวณที่เงื่อนไขสโตชาวล้นัมเบอร์อื่นๆมีขนาดแคบลงกว่าสองกรณีแรกตามที่เคยอธิบายมาแล้วข้างต้น



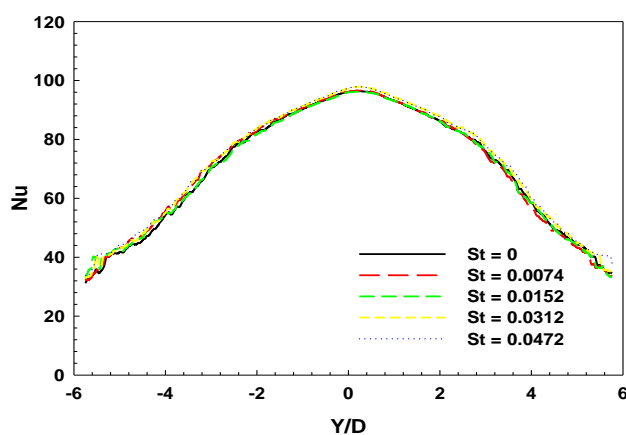
รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชน ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)



รูปที่ 5.15 แสดงการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่ระยะ $L=2D$ (จากเส้นประในรูปที่ 5.14, $Re=12,000$)



รูปที่ 5.16 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชน ที่ระยะ $L=6D$ ($Re=12,000$)



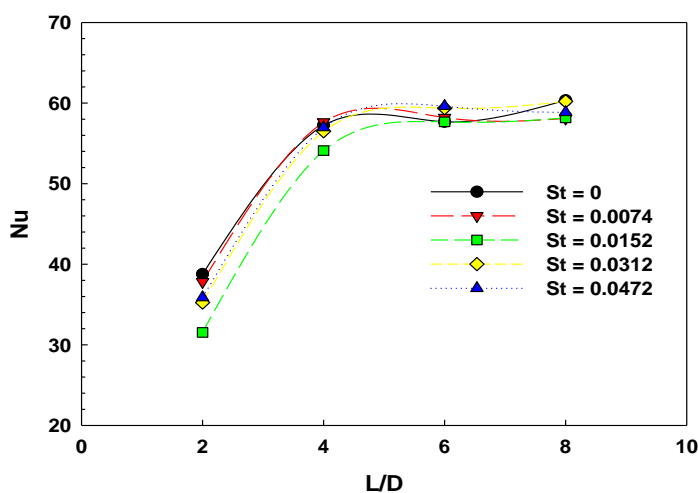
รูปที่ 5.17 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่ระยะ $L=6D$ (จากเส้นประในรูปที่ 5.16, $Re=12,000$)

รูปที่ 5.16 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=6D$ และรูปที่ 5.17 แสดงการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (จากเส้นประในรูปที่ 5.16) จากรูปพบว่า การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่เงื่อนไขสโตวาฮาล์นัมเบอร์ทั้งหมดมีลักษณะเหมือนกัน ในกรณีที่พิจารณาในรูปที่ 5.17 พบว่า การกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะทุกเงื่อนไข

โศสวาล์นัฒเบอร้สูงกว่กรณัของเจ้ท้ไหลแบบต่อเน่องเล้กน้อย จากผลการทดลองดั่งกล่าวแสดงให้ เห็นว่า เจ้ท้ไหลแบบเป็นจ้งหะมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิ่วเพิ่มข้้นสูงกว่เจ้ท้แบบ ไหลต่อเน่องที่ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชนสูง

5.2.3 นัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยบนพื้นผิ่วกรณัของเจ้ท้ล่เดียว

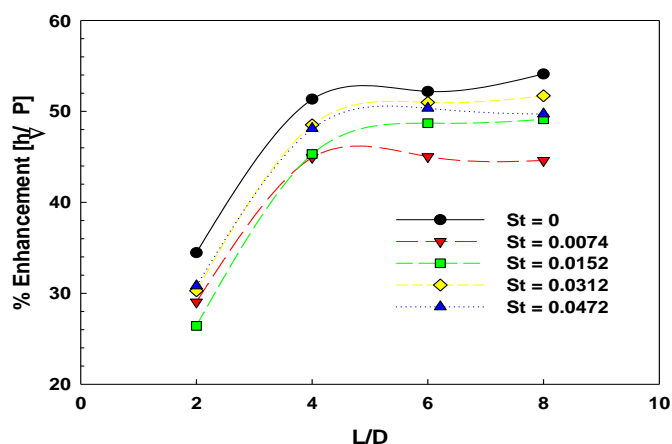
รูปที่ 5.18 แสดงค่านัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยบนพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชนอยู่ในช่วงรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ โดยภาพรวมพบว่า ที่ระยะจากปากทางออกเจ้ท้ถึงพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชน $L=2D$ นัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยมีค่าต่ำ โดยนัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยจะสูงข้้นเมือระยะจากปากทางออกเจ้ท้ถึงพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชนเพิ่มเป็น $L=4D$ และค่าเจ้ล่ยดั่งกล่าวเกือบคงที่เมือระยะจากปากทางออกเจ้ท้ถึงพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชนอยู่ในช่วง $L=4D-8D$



รูปที่ 5.18 นัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยบนพื้นผิ่วที่เจ้ท้ล่เดียวพุงชนที่อยู่ในช่วงรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ ($Re=12,000$)

เมือเปรียบเทียบนัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยของเจ้ท้ไหลแบบต่อเน่องและไหลแบบเป็นจ้งหะที่เงื่อนไขสโศสวาล์นัฒเบอร้ต่าง ๆ พบว่า ที่ระยะปากทางออกเจ้ท้ถึงพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชน $L=2D$ เจ้ท้ไหลแบบต่อเน่องมีค่านัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยสูงกว่เจ้ท้ไหลแบบเป็นจ้งหะ สำหรับที่ระยะจากปากทางออกเจ้ท้ถึงพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชนอยู่ในช่วง $L=4D$ และ $6D$ เจ้ท้ไหลแบบเป็นจ้งหะที่เงื่อนไขที่สโศสวาล์นัฒเบอร้บางกรณัมีค่านัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยสูงกว่เจ้ท้ไหลแบบต่อเน่อง โดยเฉพาะที่ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิ่วที่เจ้ท้พุงชน $L=6D$ เจ้ท้ไหลแบบเป็นจ้งหะที่เงื่อนไขที่สโศสวาล์นัฒเบอร้ทั้งหมด (ยกเว้น $St=0.0152$) มีค่านัฒเชลด์นัฒเบอร้เจ้ล่ยสูงกว่เจ้ท้ไหล

แบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=8D$ นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องสูงกว่าของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะทุกเงื่อนไข ไชสโตฮาล์นัมเบอร์ ยกเว้นที่เงื่อนไข $St=0.0312$ นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่เงื่อนไขนี้แตกต่างกับเจ็ทไหลต่อเนื่องไม่มากนัก



รูปที่ 5.19 แสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชนที่อยู่ในช่วงรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ ($Re=12,000$)

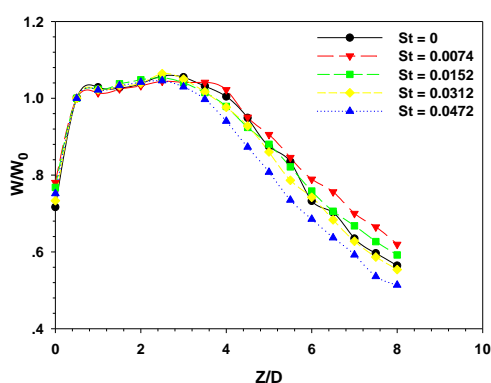
รูปที่ 5.19 แสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชนที่อยู่ในช่วงรัศมี $-5D \leq r \leq 5D$ จากรูปพบว่า กรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะทุกกรณี

จากผลการทดลองกรณีของเจ็ทลำเดี่ยวโดยภาพรวมพบว่า การไหลเป็นจังหวะของเจ็ทมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงอยู่ในช่วงระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=4D$ และ $6D$ สำหรับที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำหรือสูงกว่านี้ ($L=2D$ หรือ $L=8D$) การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะมีค่าต่ำกว่าเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง

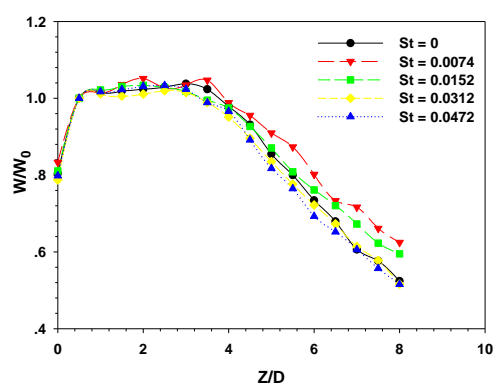
5.3 ลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน

5.3.1 การกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของกลุ่มเจ็ท

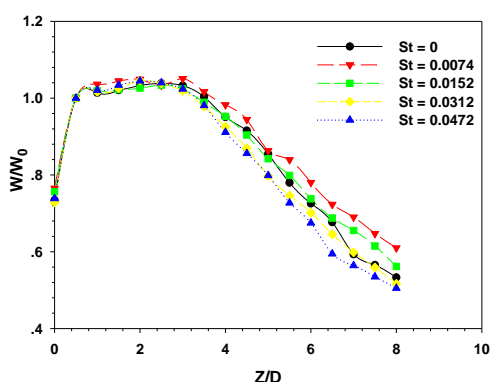
รูปที่ 5.20 และ 5.21 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวรัศมีที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทตามแนวแกน Z ที่ระยะ S ต่าง ๆ จากรูปที่ 5.20 โดยภาพรวมพบว่า การกระจายความเร็วเจ็ทในแนวแกน Z ที่ระยะ S ต่าง ๆ ระหว่างเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องและไหลแบบเป็นจังหวะแตกต่างกันไม่มากนัก คือ ที่ระยะ $Z \leq 2D$ ความเร็วของเจ็ทเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคงที่ และที่ระยะ $Z \geq 3D$ ความเร็วของเจ็ทเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยความเร็วของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องเกิดการลดลงรวดเร็วกว่าเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ โดยที่เงื่อนไข $St=0.0074$ ความเร็วของเจ็ทในแนวแกน Z สูงกว่าเงื่อนไขอื่น ๆ เมื่อระยะ Z เพิ่มขึ้น



(ก) S=2D



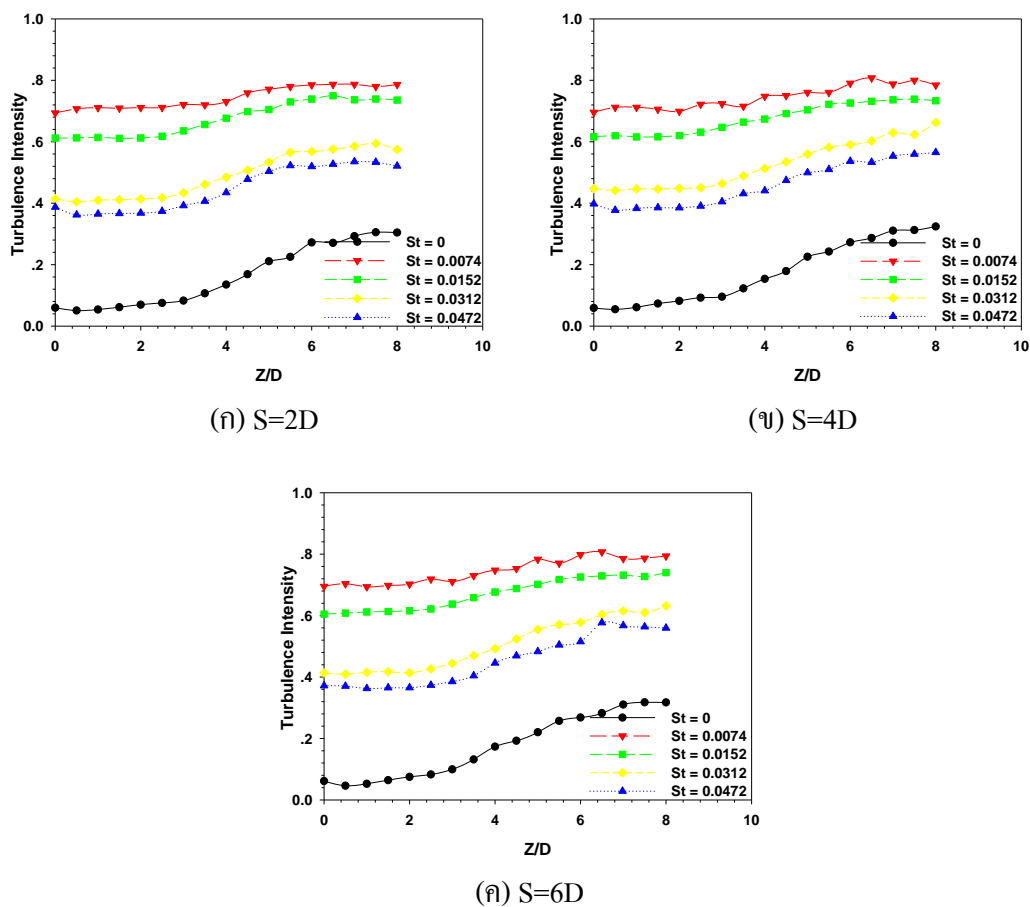
(ข) S=4D



(ค) S=6D

รูปที่ 5.20 การกระจายความเร็วของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ทตามแนวแกน Z

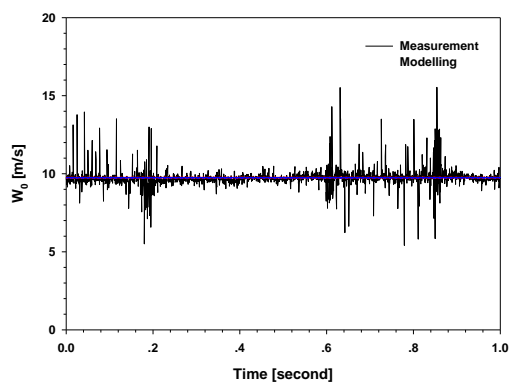
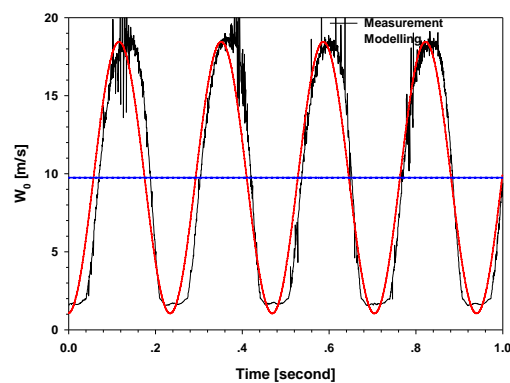
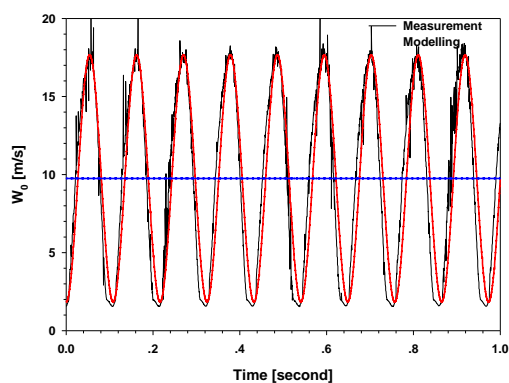
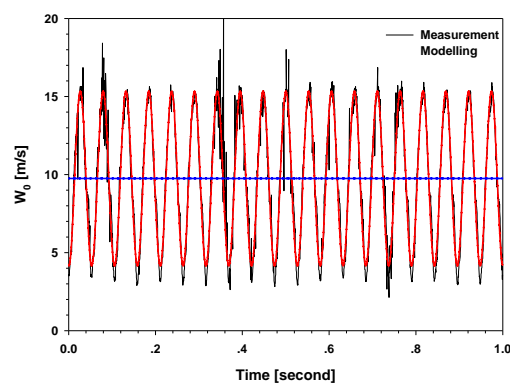
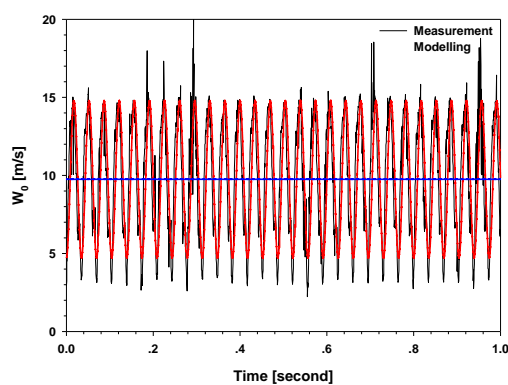
$$(\overline{W}_0=12.1 \text{ m/s, Re}=12,000)$$



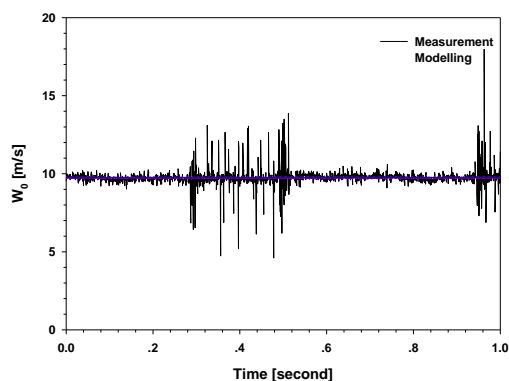
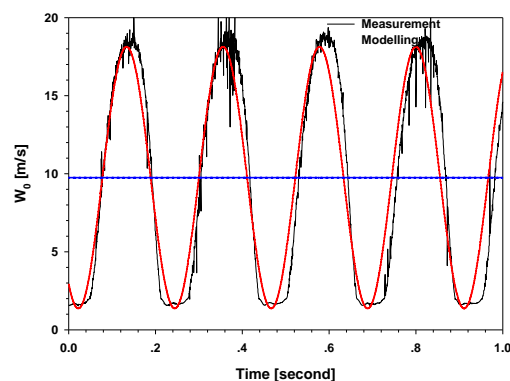
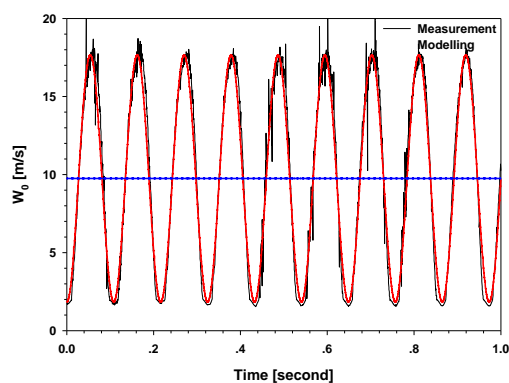
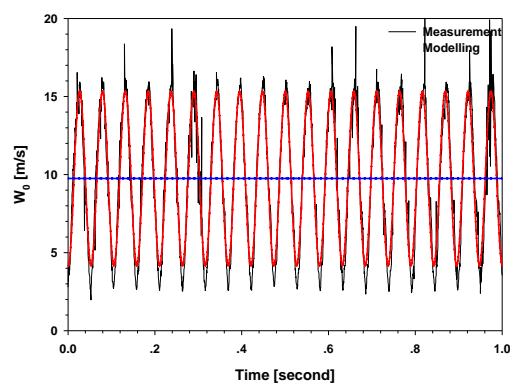
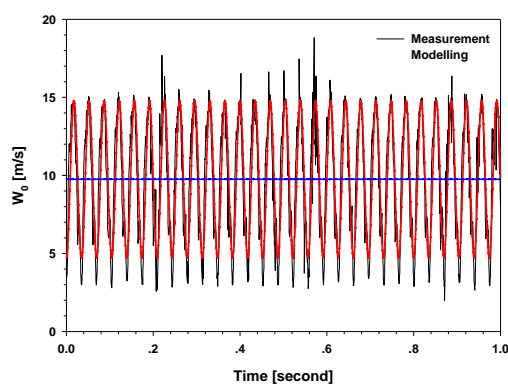
รูปที่ 5.21 การกระจายความปั่นป่วนของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ทตามแนวแกน Z

$$(\overline{W_0}=12.1 \text{ m/s, Re}=12,000)$$

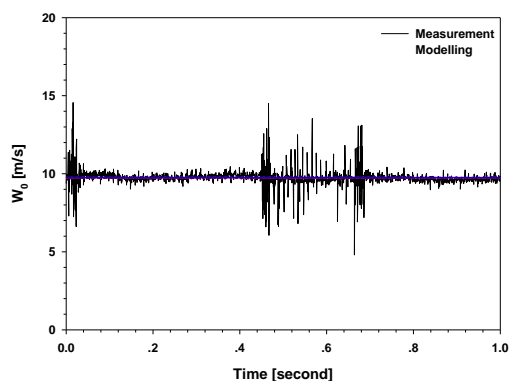
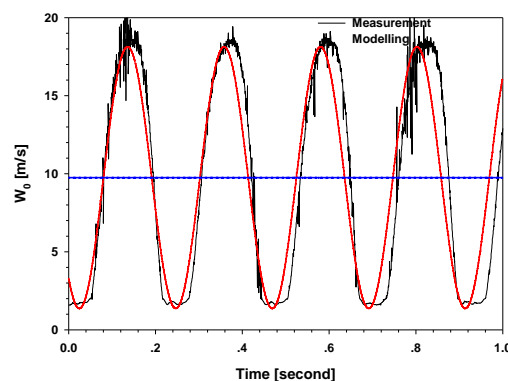
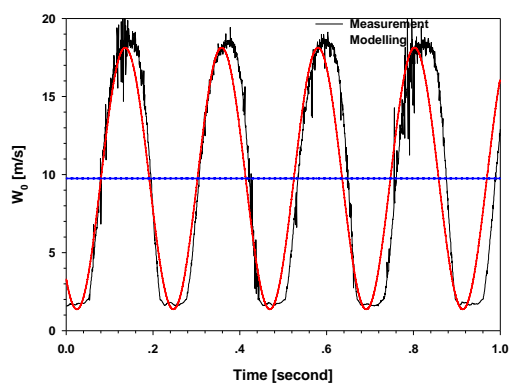
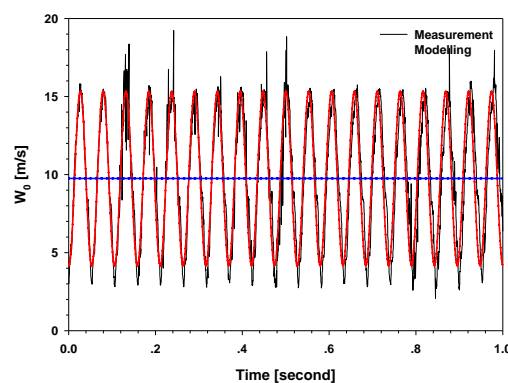
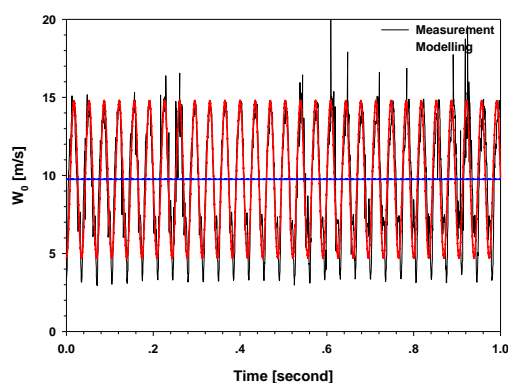
สำหรับการกระจายของความปั่นป่วนพบว่า ที่ระยะ S ต่าง ๆ การกระจายความปั่นป่วนของเจ็ทมีค่าแตกต่างกันไม่มาก และการกระจายความปั่นป่วนของเจ็ทที่ระยะ S ต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะ Z เพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องมีค่าความปั่นป่วนต่ำสุด และค่าความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้นเมื่อสโตวฮาล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไข $St=0.0074$ การกระจายของความปั่นป่วนมีค่าสูงสุด และการกระจายของความปั่นป่วนมีแนวโน้มลดลงเมื่อสโตวฮาล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น

(ก) $St=0$ ($f=0$ Hz)(ข) $St=0.0074$ ($f=4.5$ Hz)(ค) $St=0.0152$ ($f=9.25$ Hz)(ง) $St=0.0312$ ($f=19$ Hz)(จ) $St=0.0472$ ($f=28.5$ Hz)

รูปที่ 5.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ทที่ระยะ $Z \approx 0D$,
 $S=2D$ ($\overline{W_0}=12.1$ m/s, $Re=12,000$)

(ก) $St=0$ ($f=0$ Hz)(ข) $St=0.0074$ ($f=4.5$ Hz)(ค) $St=0.0152$ ($f=9.25$ Hz)(ง) $St=0.0312$ ($f=19$ Hz)(จ) $St=0.0472$ ($f=28.5$ Hz)

รูปที่ 5.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ตตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ตที่ระยะ $Z \approx 0D$,
 $S=4D$ ($\overline{W_0}=12.1$ m/s, $Re=12,000$)

(ก) $St=0$ ($f=0$ Hz)(ข) $St=0.0074$ ($f=4.5$ Hz)(ค) $St=0.0152$ ($f=9.25$ Hz)(ง) $St=0.0312$ ($f=19$ Hz)(จ) $St=0.0472$ ($f=28.5$ Hz)

รูปที่ 5.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ตตำแหน่งตรงกลางของกลุ่มเจ็ตที่ระยะ $Z \approx 0D$,
 $S=6D$ ($\bar{W}_0=12.1$ m/s, $Re=12,000$)

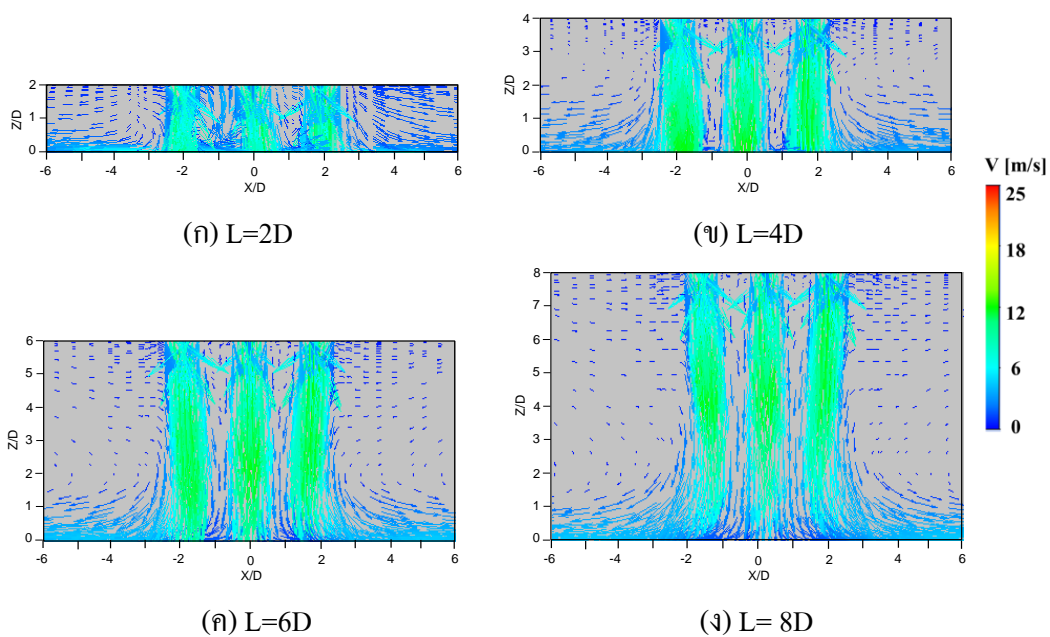
รูปที่ 5.22-5.24 แสดงผลจากการวิเคราะห์ความถี่ต่อช่วงเวลาของการไหลเป็น
 จังหวะที่ปากทางออกเจ็ต ($Z \approx 0D$) โดยใช้ FFT จากรูปพบว่า กรณิของเจ็ตไหลแบบต่อเนื่องที่ระยะ

S ต่าง ๆ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.22(ก), 5.23(ก) และ 5.24(ก) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วก่อเกิดขึ้นน้อยจนเกือบคงที่ (เชิงเส้น) สำหรับในกรณีของเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความเร็วจ็ทมีลักษณะเป็นรูปคลื่น โดยความถี่ของจำนวนคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อสโตวฮาวล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น และขนาดของความเร็วยุติของรูปคลื่น (ยอดคลื่น) เพิ่มขึ้นเมื่อสโตวฮาวล์นัมเบอร์ลดลง

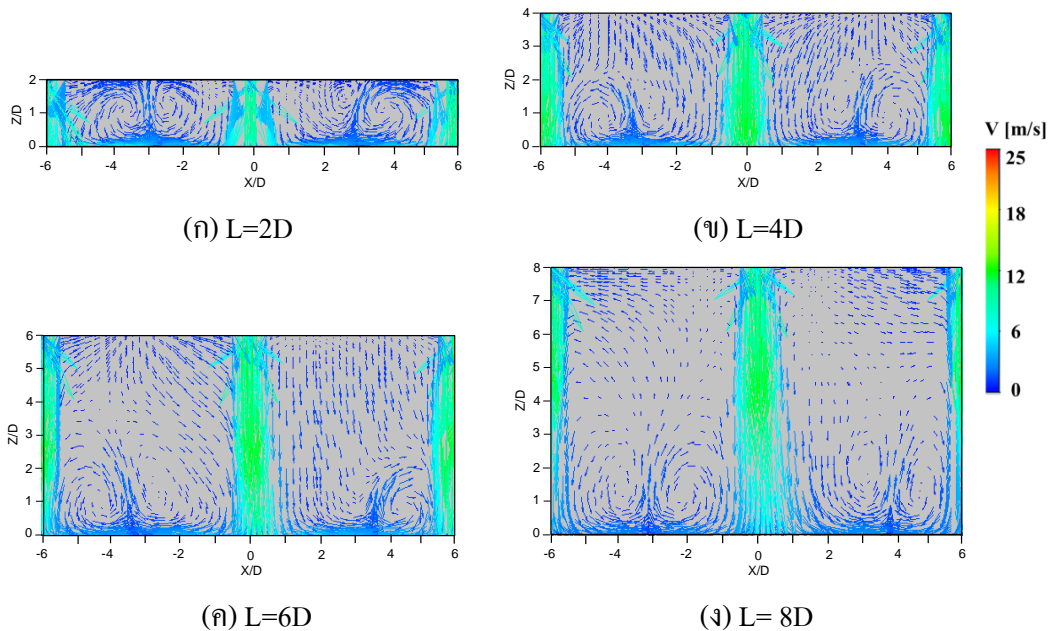
5.3.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ได้จากการจำลองการไหลโดยใช้ CFD ของกลุ่มเจ็ท

รูปที่ 5.25 แสดงผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ต่างๆ จากรูปพบว่า ที่ระยะ $S=2D$ เจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิวจะไหลเรียบตามผนัง โดยที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ $L=2D$ (รูปที่ 5.25(ก)) จะเกิดการม้วนตัวของเจ็ทผนังและไหลเป็นกระแสหมุนวนเข้ามาผสมกับเจ็ท เนื่องจากผนังทั้งสองอยู่ในช่วงที่แคบ ทำให้การไหลบนผนังเกิดการม้วนตัวเข้ามาผสมกับกระแสเจ็ทมาก และเกิดการผสมระหว่างลำเจ็ทน้อย เนื่องจากระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวใกล้ ทำให้การผสมของเจ็ทเกิดขึ้นน้อย สำหรับที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้นเป็น $L=4D$ (รูปที่ 5.25(ข)) พบว่ากระแสหมุนวนดังกล่าวมีขนาดเพิ่มขึ้นและการเข้ามาผสมกับกระแสเจ็ททำได้น้อยลง แต่การผสมระหว่างลำเจ็ทเพิ่มขึ้น สำหรับที่ระยะ $L=6D$ และ $8D$ พบว่า กระแสหมุนวนดังกล่าวไม่ปรากฏ แต่การผสมระหว่างลำเจ็ทมีเพิ่มมากขึ้น และแกนของลำเจ็ทถูกผสมเข้ากับลำเจ็ทตรงกลางเพิ่มมากขึ้น

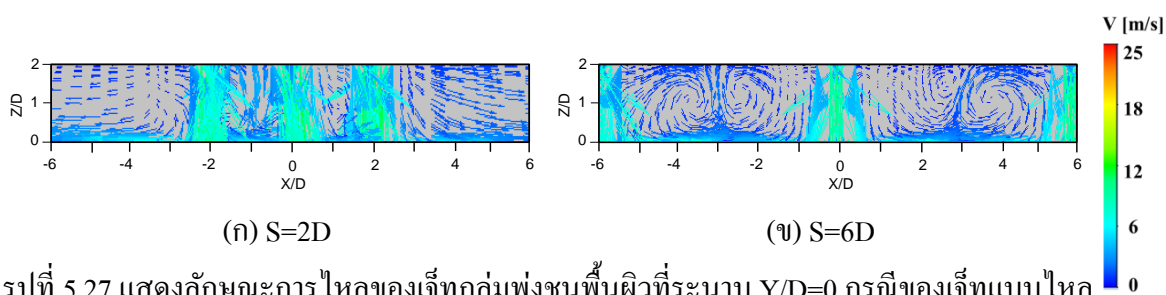
รูปที่ 5.26 แสดงผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ต่างๆ จากรูปพบว่า ที่ระยะ $S=6D$ เจ็ทหลังจากพุ่งชนพื้นผิวจะไหลเรียบตามผนัง โดยที่ระยะ $L=2D$ (รูปที่ 5.26(ก)) จะเกิดการชนกันของเจ็ทผนังระหว่างลำเจ็ทและไหลม้วนเป็นกระแสหมุนวนเข้ามาผสมกับเจ็ท และถูกจำกัดการไหลโดยลำเจ็ทรอบข้าง ทำให้การไหลบนผนังเกิดการไหลม้วนเข้ามาผสมกับกระแสเจ็ทมาก สำหรับที่ระยะ $L=4D$ (รูปที่ 5.26(ข)) พบว่ากระแสหมุนวนดังกล่าวมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่ไหลเข้ามาผสมกับกระแสเจ็ทน้อยลง สำหรับที่ระยะ $L=6D$ และ $8D$ พบว่า กระแสหมุนวนดังกล่าวมีขนาดเพิ่มมากขึ้นกว่าที่ระยะ $L=4D$ แต่การผสมกับกระแสเจ็ทน้อยลงมาก



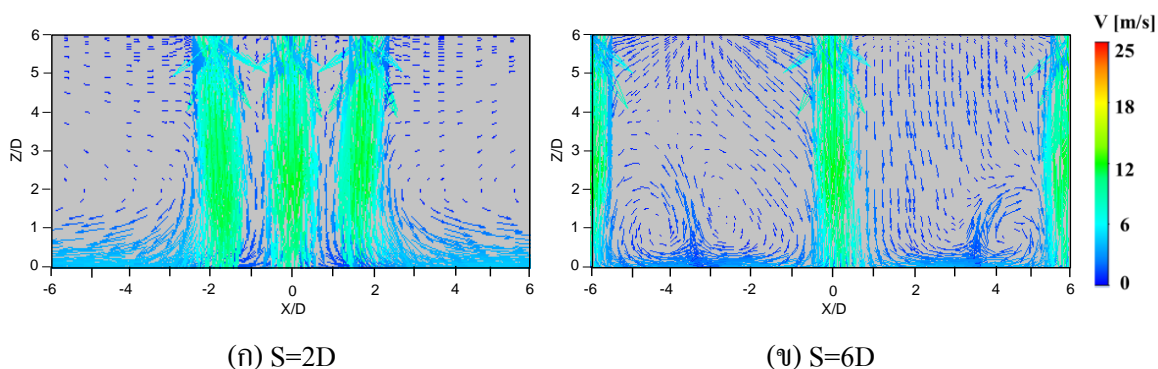
รูปที่ 5.25 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)



รูปที่ 5.26 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)



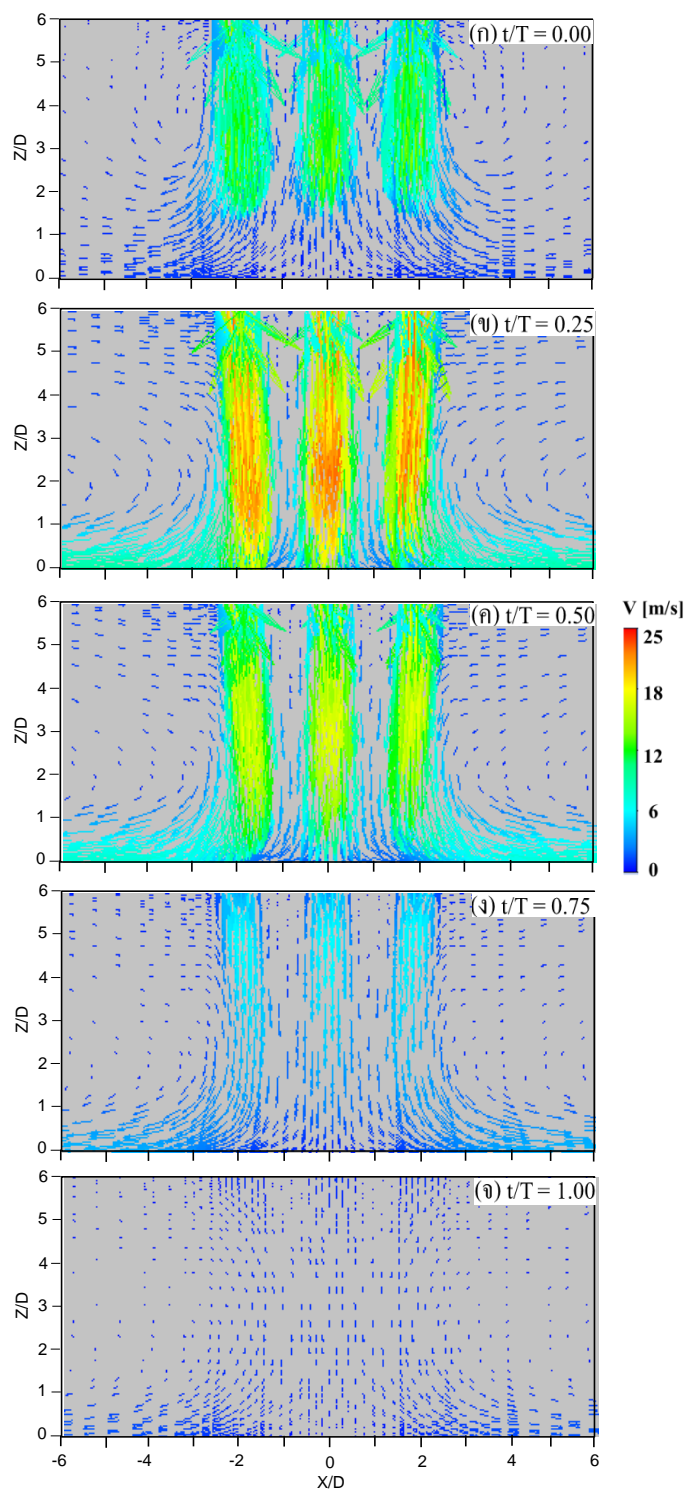
รูปที่ 5.27 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)



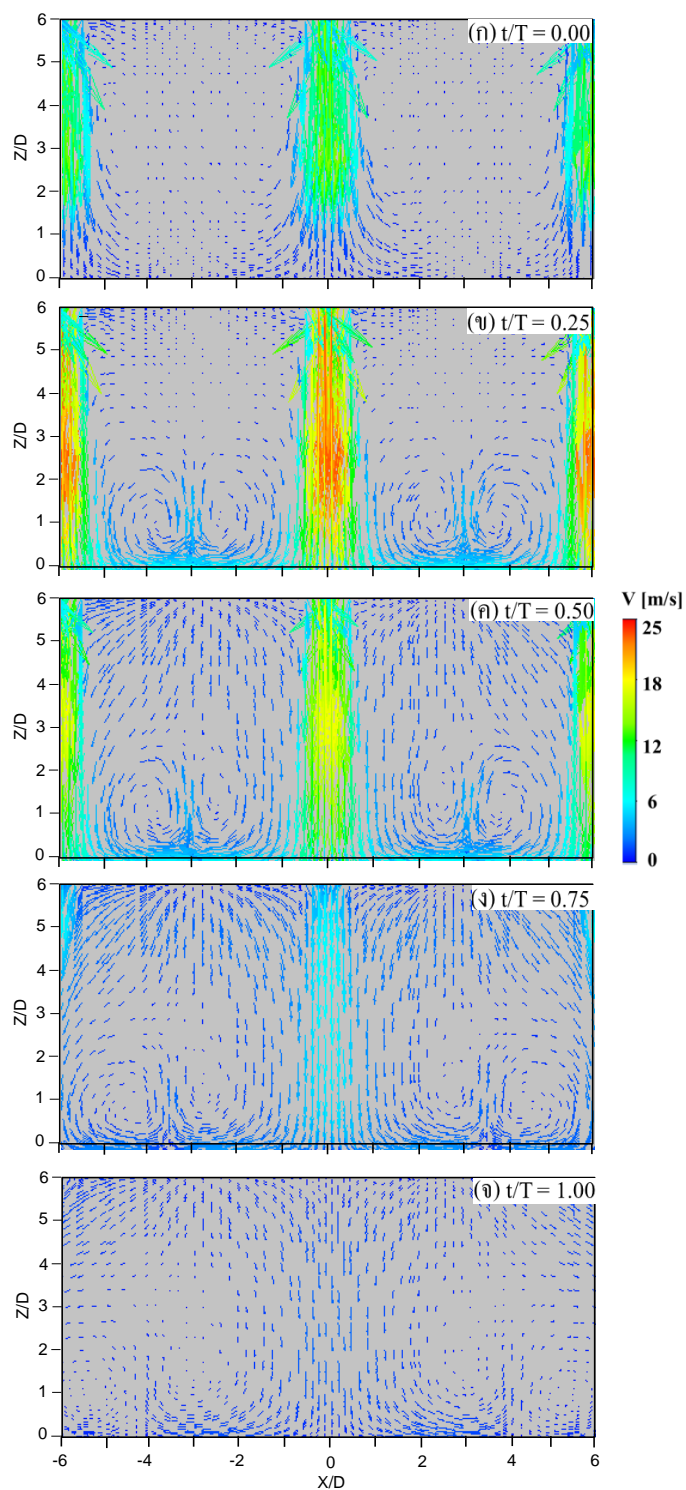
รูปที่ 5.28 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะ $L=6D$ ($Re=12,000$)

รูปที่ 5.27 แสดงผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ จากรูปพบว่า ที่ระยะ $S=2D$ จะเกิดการม้วนตัวของเจ็ทผนังและไหลเป็นกระแสหมุนวนเข้ามาผสมกับเจ็ทรอบข้าง และไม่เกิดการผสมระหว่างลำเจ็ทตรงกลางและลำเจ็ทรอบข้าง เนื่องจากระยะปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนต่ำ ทำให้การไหลของลำเจ็ทตรงกลางไม่ถูกรบกวนด้วยกระแสหมุนวน สำหรับที่ระยะ $S=6D$ (รูปที่ 5.27(ข)) จะเกิดการชนกันของเจ็ทผนังระหว่างลำเจ็ทและไหลม้วนเป็นกระแสหมุนวนเข้ามาผสมกับลำเจ็ทตรงกลางและลำเจ็ทรอบข้าง

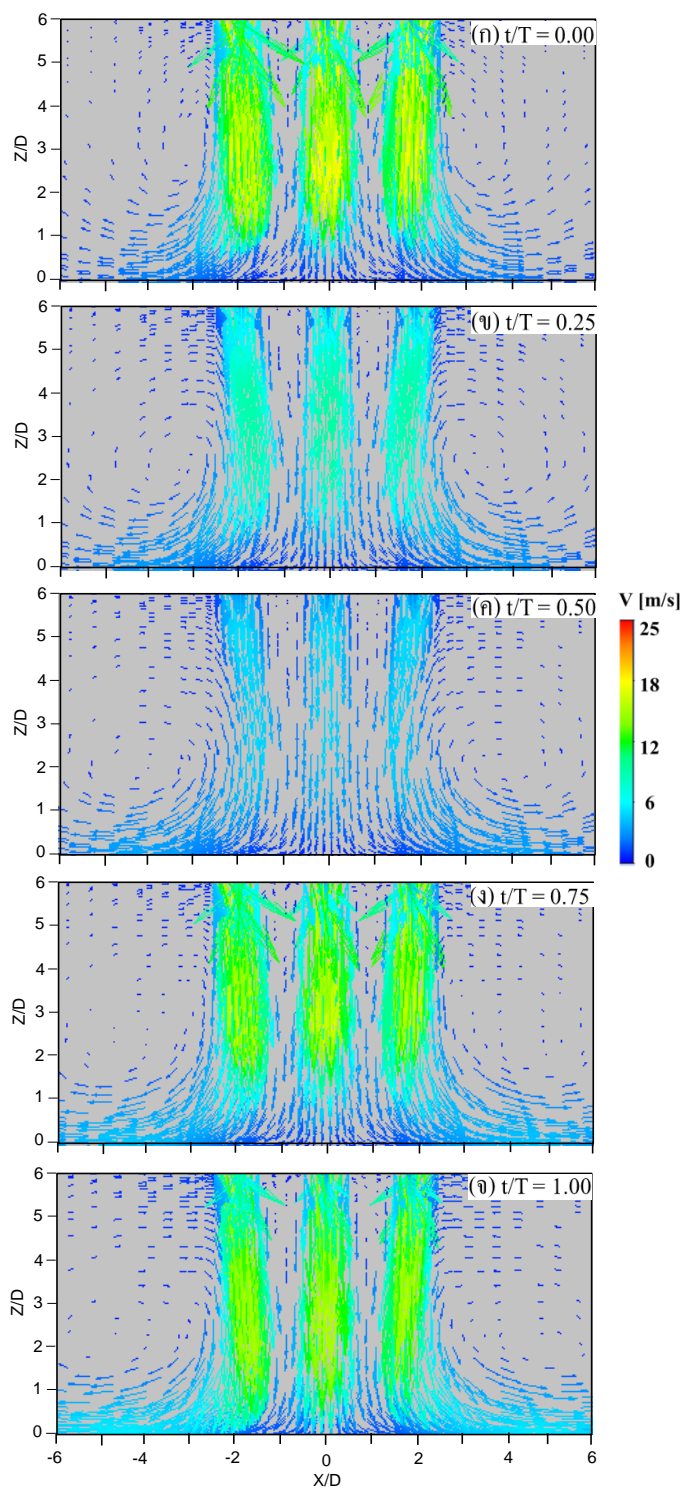
รูปที่ 5.28 แสดงผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ระนาบ $Y/D=0$ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=6D$ จากรูปพบว่า ที่ระยะ $S=2D$ เกิดการผสมของลำเจ็ทตรงกลางและลำเจ็ทรอบข้าง เนื่องจากระยะปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนเพิ่มขึ้น ทำให้การไหลของลำเจ็ทตรงกลางเกิดการผสมกับลำเจ็ทรอบข้าง สำหรับที่ระยะ $S=6D$ (รูปที่ 5.28(ข)) เกิดการชนกันของเจ็ทผนังและมีกระแสหมุนวนเกิดขึ้น แต่มีการผสมกับลำเจ็ทน้อย ทำให้ลำเจ็ทตรงกลางไม่ถูกรบกวน ทำให้มีลักษณะการไหลเหมือนกับกรณีเจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิว



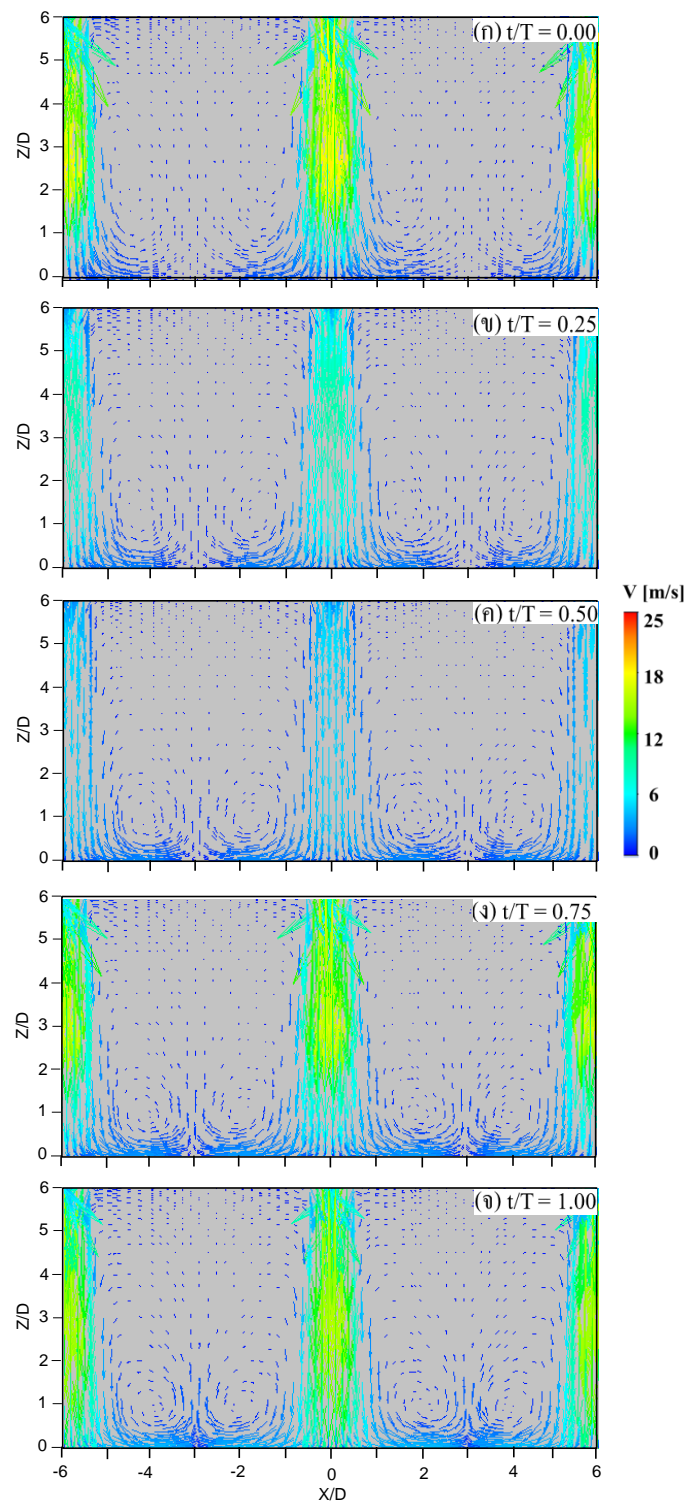
รูปที่ 5.29 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพวงชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่ถี่พอ $St=0.0074$ ระยะ $S=2D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0, Re=12,000$)



รูปที่ 5.30 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มฟุ้งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่ถี่เกินไป $St=0.0074$ ระยะ $S=6D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)



รูปที่ 5.31 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่ถี่เกินไป $St=0.0472$ ระยะ $S=2D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)



รูปที่ 5.32 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนพื้นผิวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่ถี่เกินไป $St=0.0472$ ระยะ $S=6D$ ระยะ $L=6D$ ($Y/D=0$, $Re=12,000$)

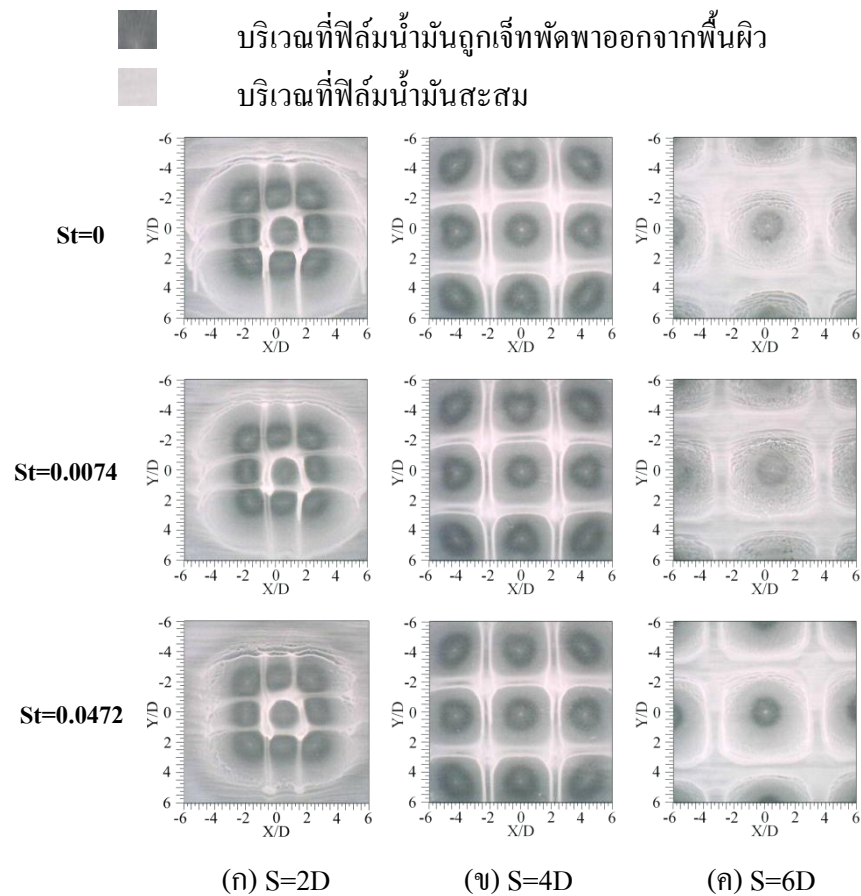
รูปที่ 5.29 และ 5.30 แสดงผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ที่ระนาบ $Y/D=0$ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=6D$ ที่ระยะเวลาต่างๆ กรณีของ เจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0074$ และ 0.0472 ตามลำดับ จากรูปพบว่า ที่ระยะ $S=2D$ เจ็ทหลังจากที่พุ่งชนพื้นผิว ทำให้เกิดกระแสหมุนวนของเจ็ทผนังคล้ายกับที่เกิดขึ้นในลักษณะการ ไหลของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.25(ค) โดยกระแสหมุนวนดังกล่าวจะเลื่อน ตำแหน่งไปในทิศทางรัศมีของเจ็ทเมื่อ t/T เพิ่มขึ้น โดยจุดหมุนวนของกระแสหมุนวนกรณีที่เงื่อนไข $St=0.0472$ (รูปที่ 5.31) เกิดขึ้นใกล้ตำแหน่งศูนย์กลางเจ็ทมากกว่าที่เงื่อนไข $St=0.0074$ (รูปที่ 5.29)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลของเจ็ทที่ระยะ $S=6D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.30 และ 5.32 สำหรับที่เงื่อนไข $St=0.0074$ และ 0.0472 ตามลำดับ พบว่า ผลของการไหลเป็นจังหวะ ของเจ็ทมีลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นคล้ายกับเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.26(ค) ที่ เงื่อนไข $St=0.0472$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.32 พบว่า ที่เงื่อนไข $St=0.0074$ เกิดการชนกันของผนัง และไหลม้วนเป็นกระแสหมุนวนที่มีความเร็วสูงกว่าที่เงื่อนไข $St=0.0472$ และเกิดช่องว่างของการ ไหล (ความเร็วใกล้ศูนย์) ที่เงื่อนไข $St=0.0074$

5.3.3 ลักษณะการไหลบนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ท

รูปที่ 5.33 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน กรณี ของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L=2D$ บริเวณสีขาวเป็น บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม และบริเวณสีดำเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว จาก รูปพบว่า ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน โดยบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะ เห็นจุดสีขาวของน้ำมันที่สะสมอยู่ สำหรับบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเป็นบริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพา ออกไปรอบๆ (บริเวณที่เป็นสีดำไม่มีน้ำมันเกาะติด) เนื่องจากการไหลบนพื้นผิวมีความเร่งเกิดขึ้น และมีความเค้นเฉือนบนพื้นผิวที่สูง และบริเวณของเจ็ทผนังเป็นบริเวณที่เจ็ทเปลี่ยนเป็นการไหลบน พื้นผิว ในบริเวณดังกล่าวฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกไปบางส่วนจากพื้นผิว (บริเวณที่เห็นเป็นสี ขาวสลับสีดำ) และในบริเวณสีขาวเป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างลำเจ็ทกับลำเจ็ท

โดยที่ระยะ S ต่าง ๆ พบว่า ลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวกรณี $St=0.0074$ เหมือนกับลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันในกรณี $St=0$ แต่ที่เงื่อนไข $St=0.0472$ บริเวณ ที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออก (บริเวณที่เป็นสีดำ) มีความเข้มของสีจางกว่าที่เงื่อนไข $St=0.0074$

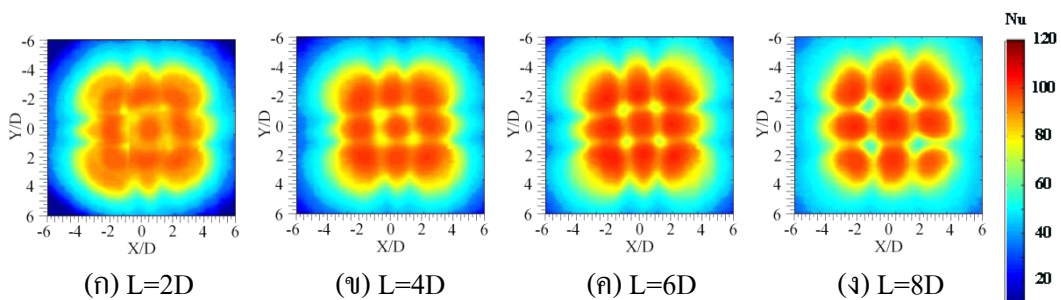


รูปที่ 5.33 แสดงลักษณะการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่ระยะเวลาหลังจากพุ่งชน 150 วินาที ที่ระยะ $L=2D$ ($Re=12,000$)

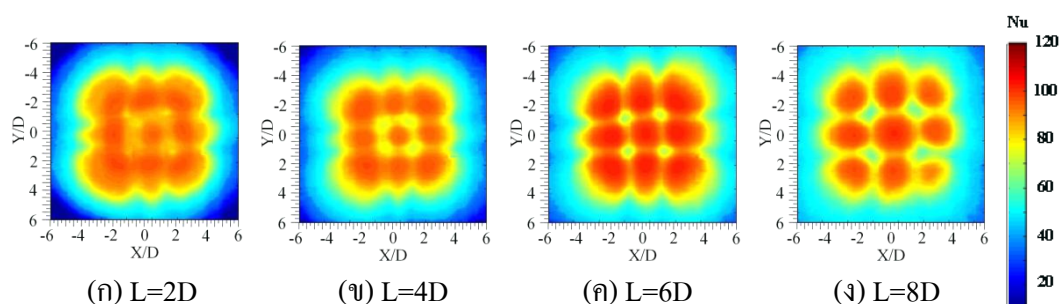
จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกกรณีเงื่อนไข $St=0.0074$ มีลักษณะใกล้เคียงกับ $St=0$ นั้น เกิดจากความเร็วสูงสุดของรูปคลื่น (ยอดคลื่น) ตามที่แสดงในรูปที่ 5.22-5.24 ที่เงื่อนไข $St=0.0074$ มีขนาดยอดคลื่นสูงกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ ($L=2D$) ขนาดของความเร็วสูงสุดของการไหลเป็นจังหวะมีผลต่อการพัดฟิล์มน้ำมันให้ไหลออกจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน

5.4 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

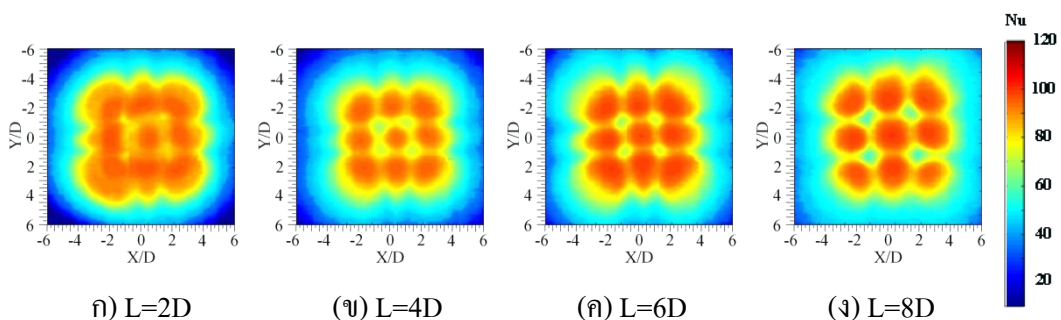
5.4.1 ผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีต่อการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ท



รูปที่ 5.34 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)

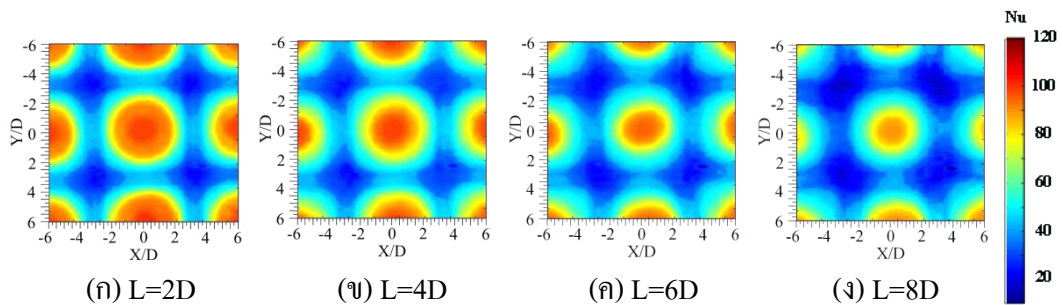


รูปที่ 5.35 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0472$) ที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)

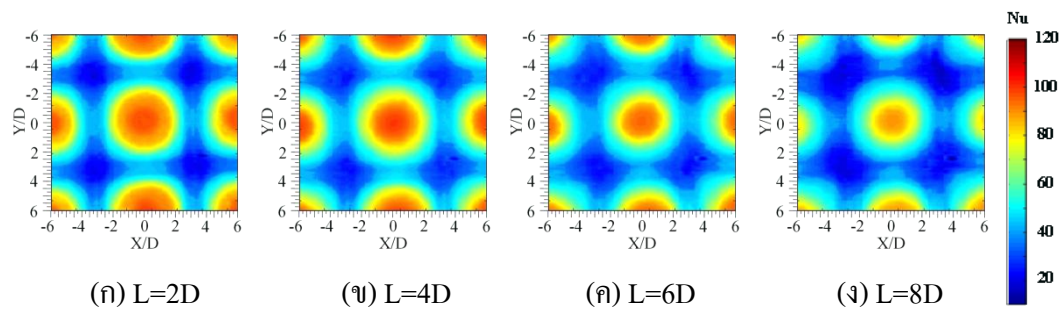


รูปที่ 5.36 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0074$) ที่ระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)

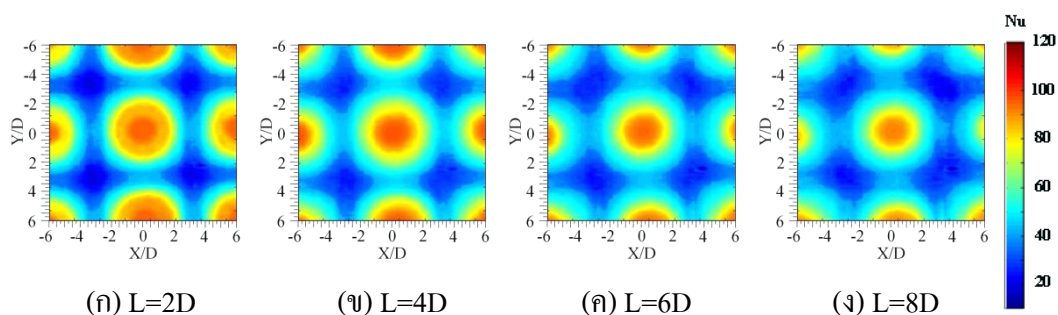
รูปที่ 5.34-5.36 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=2D$ โดยเปรียบเทียบที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างๆ จากรูปพบว่า เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น นัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนจะเพิ่มขึ้น สำหรับที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ ในกรณีเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.0472$ และ 0.0047 (รูปที่ 5.35(ก) และ 5.36(ก)) พบว่านัสเซิลต์นัมเบอร์แตกต่างจากเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องไม่มากนัก ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูงขึ้นพบว่า นัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะทั้งสองกรณีมีค่าต่ำกว่ากรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 5.37 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนต่างๆ กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)



รูปที่ 5.38 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนต่างๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0472$) ที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)



รูปที่ 5.39 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุงชนต่าง ๆ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ($St=0.0074$) ที่ระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)

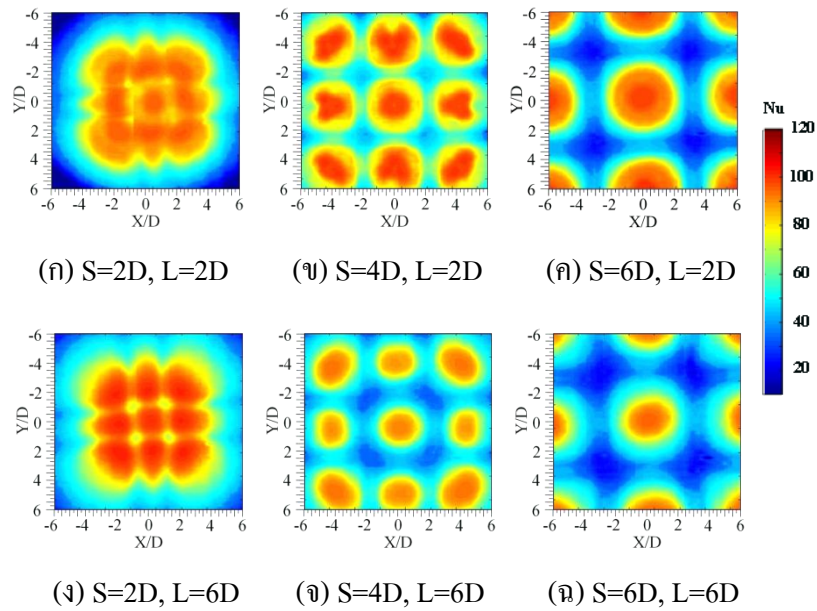
ในกรณีที่เงื่อนไขระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=6D$ ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 5.37-5.39 พบว่า เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนเพิ่มขึ้น นัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณที่เจ็ทพุงชนโดยตรงมีค่าลดลง สำหรับกรณีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนสูง $L=8D$ พบว่า นัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณระหว่างที่เจ็ทพุงชนมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวพุงชนอื่นๆ สำหรับกรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะพบว่าที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวพุงชนดังกล่าว (รูปที่ 5.38(ง) และ 5.39(ง)) นัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณระหว่างที่เจ็ทพุงชนสูงกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่เงื่อนไข $St=0.0074$

5.4.2 ผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มของเจ็ทพุงชน

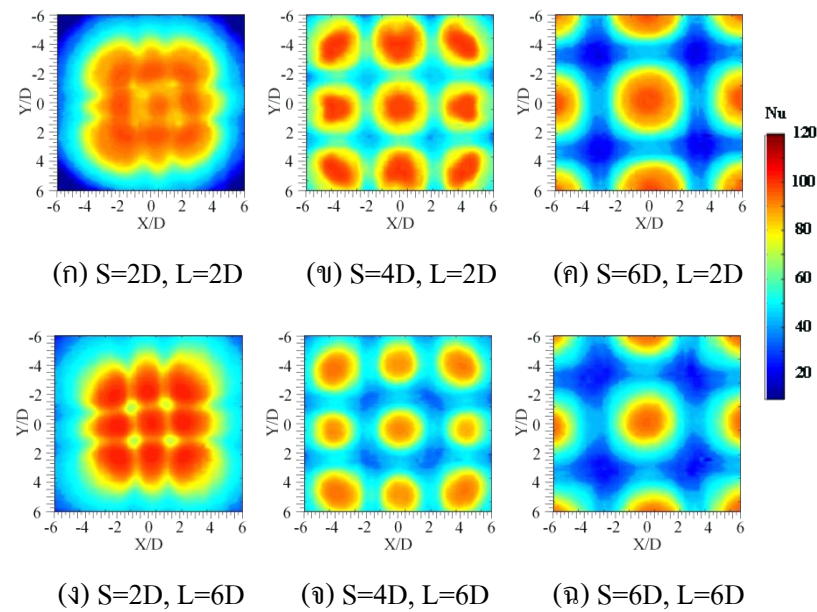
รูปที่ 5.40-5.42 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ทพุงชน โดยเปรียบเทียบที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทต่างๆ โดยภาพรวมของผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเพิ่มขึ้น นัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณพื้นผิวตรงกลางลดลงและนัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณระยะห่างระหว่างลำเจ็ทขยายกว้างขึ้นตามระยะห่างระหว่างลำเจ็ท และนัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณรอบลำเจ็ทตรงกลางสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$

เมื่อพิจารณาผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทกรณีของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะ ตามที่แสดงในรูปที่ 5.41 และ 5.42 โดยเปรียบเทียบกับเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องตามที่แสดงในรูปที่ 5.40 ที่เงื่อนไขระยะ L และ S เดียวกันพบว่า การเปลี่ยนแปลงของการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ระหว่างเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะมีผลน้อยมากเมื่อระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเปลี่ยน ซึ่งแตกต่างจากกรณีผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน การกระจาย

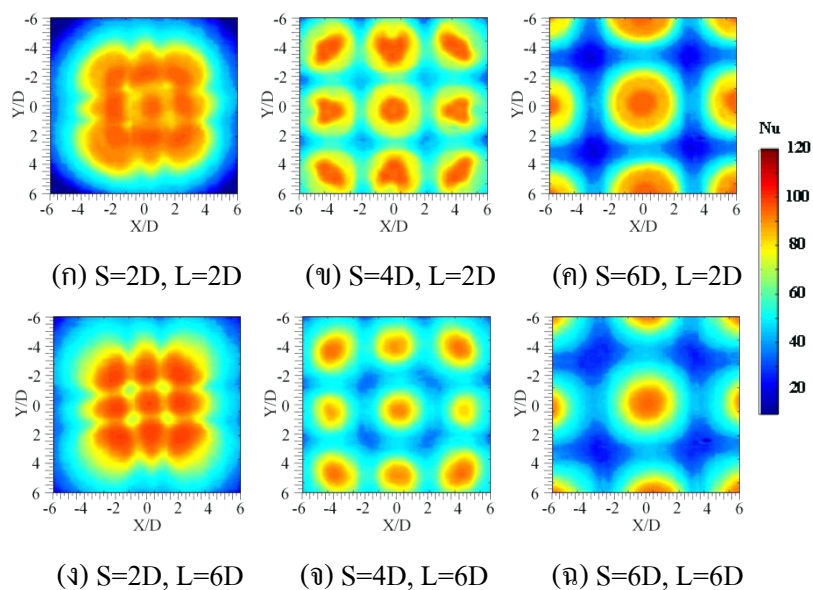
นัสเซิลต์นัมเบอร์ระหว่างเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและแบบไหลเป็นจังหวะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.4.1



รูปที่ 5.40 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน กรณีของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ($Re=12,000$)



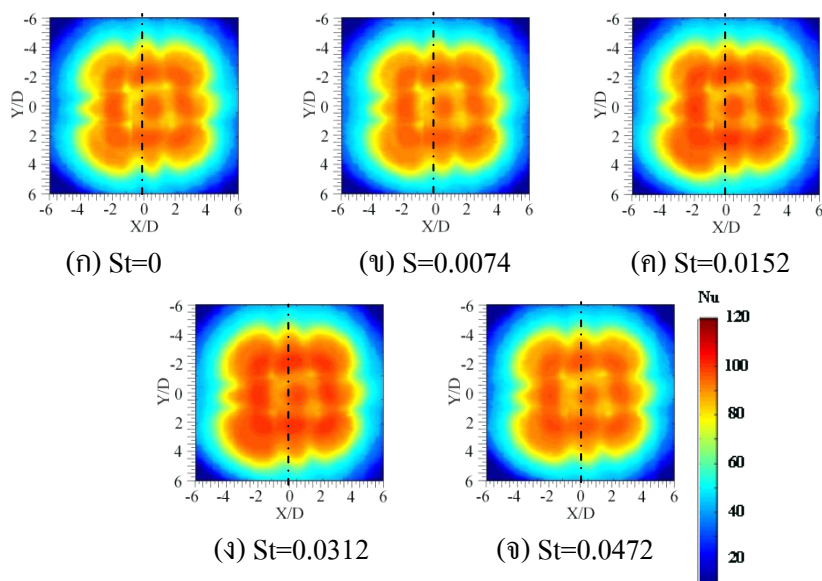
รูปที่ 5.41 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่ถี่พอ $St=0.0472$ ($Re=12,000$)



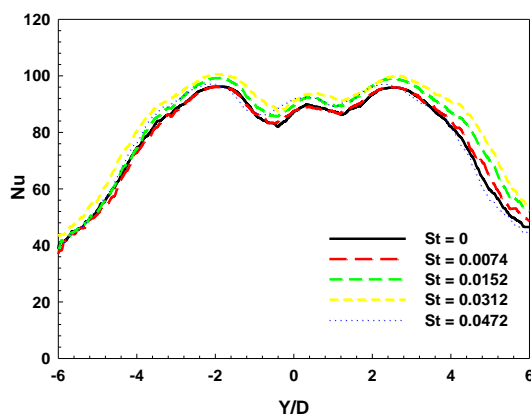
รูปที่ 5.42 แสดงการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะที่ถี่พอ $St = 0.0074$ ($Re=12,000$)

5.4.3 ผลของความถี่ของเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มของเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 5.43 แสดงการถ่ายเทความร้อนและการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์ที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่สโตวาฮาล์นัมเบอร์ต่าง ๆ พบว่า ที่ระยะ $S=2D$, $L=2D$ เมื่อสโตวาฮาล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ความปั่นป่วนของกลุ่มเจ็ทและการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ที่ถี่พอ $S=2D$, $L=2D$ กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง มีระยะห่างระหว่างลำเจ็ทและระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนน้อย เมื่อกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดการจำกัดการไหลระหว่างลำเจ็ท ทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณพื้นผิวระหว่างลำเจ็ทต่ำดังแสดงในรูปที่ 5.44 แต่กรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ ด้วยลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทเป็นแบบลูกคลื่นทำให้เกิดช่องว่างในการไหลคือช่วงเวลาที่ความเร็วเจ็ทต่ำสุด จะทำให้ของไหลที่อยู่บริเวณลำเจ็ทตรงกลางเกิดการถ่ายเทออกมาเป็นช่วยทำลายการไหลวนของของไหลระหว่างลำเจ็ทหรือเป็นการลดการจำกัดการไหลของลำเจ็ท จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณพื้นผิวระหว่างลำเจ็ทดีขึ้น



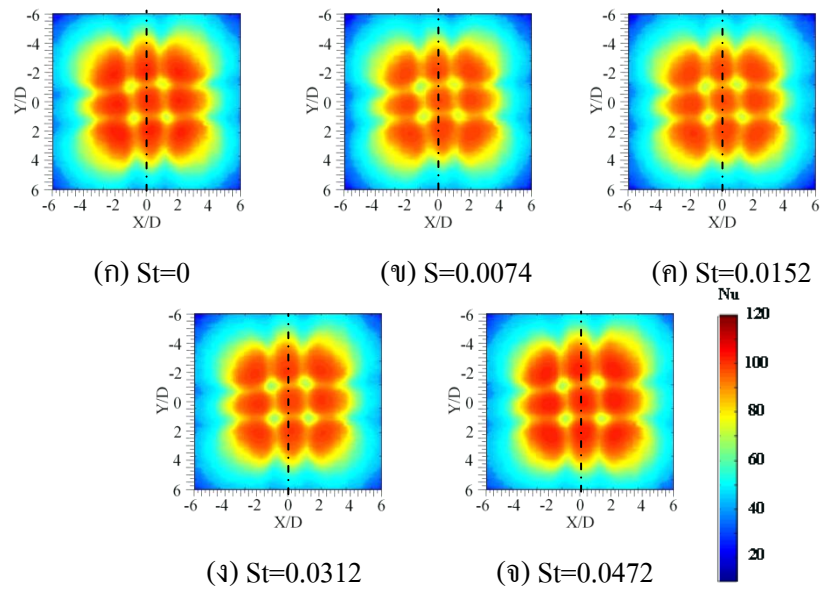
รูปที่ 5.43 แสดงการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=2D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)



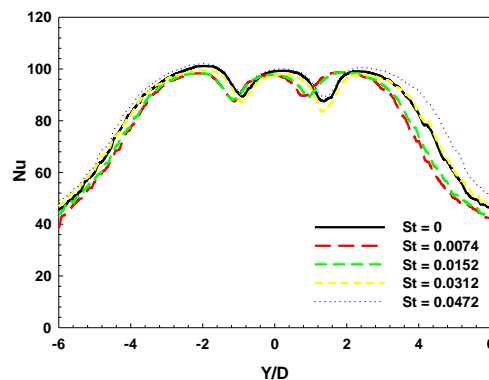
รูปที่ 5.44 แสดงการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่สโตวฮาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S = 2D$, $L = 2D$ ($Re=12,000$)

จากรูปที่ 5.45 แสดงการถ่ายเทความร้อนและการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์ที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่สโตวฮาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ พบว่า ที่เงื่อนไข $S=2D$, $L=6D$ เมื่อสโตวฮาล์วนัมเบอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความปั่นป่วนของกลุ่มเจ็ทเพิ่มขึ้นและทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากกรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทน้อย และระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชนมาก ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างลำเจ็ทตรงกลางและลำเจ็ทรอบ ๆ ทำให้ความปั่นป่วนความเร็วในการพุ่งชนเพิ่มมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนจึงดีขึ้นด้วย และกรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบสั่นเป็นจังหวะมีความปั่นป่วนความเร็วเจ็ทสูง ทำให้ความปั่นป่วนความเร็วเพิ่มมากขึ้นอีก

และด้วยการไหลลักษณะแบบลูกคลื่น ส่งผลให้เกิดการทำลายชั้นขอบเขตการไหลบนผนัง ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะบริเวณเจ็ทผนังมีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลุ่มเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.46



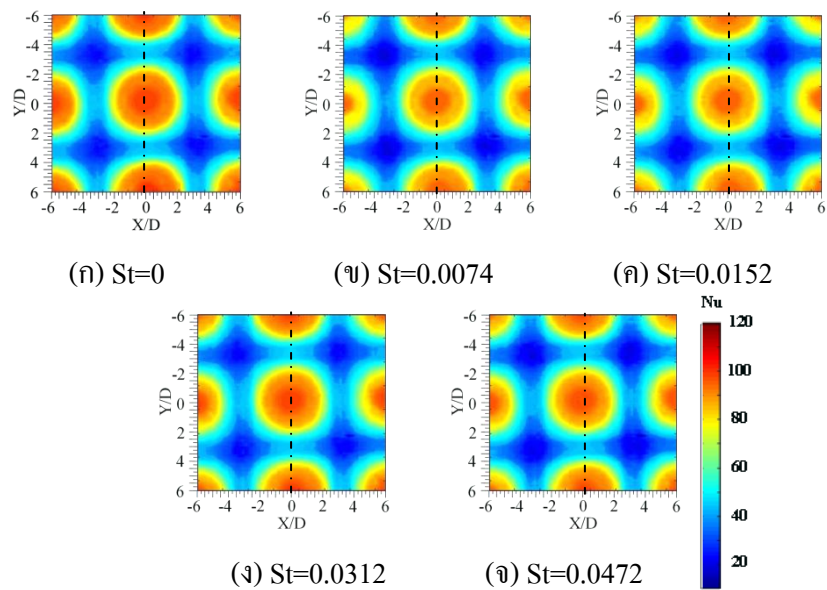
รูปที่ 5.45 แสดงการกระจายนัสเซลต์บนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ทพุงชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=2D$, $L=6D$ ($Re=12,000$)



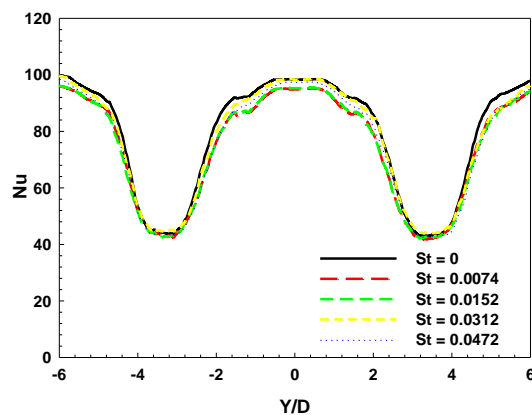
รูปที่ 5.46 แสดงการกระจายนัสเซลต์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกลุ่มเจ็ทพุงชน ที่สโตวฮาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S=2D$, $L=6D$ ($Re=12,000$)

จากรูปที่ 5.47 แสดงการถ่ายเทความร้อนและการกระจายนัสเซลต์บนพื้นผิวของกลุ่มเจ็ทพุงชนพื้นผิว ที่เงื่อนไข $S=6D$, $L=2D$ พบว่า อิทธิพลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมีน้อย ทำให้กลุ่มเจ็ทพุงชนพื้นผิวมีลักษณะเหมือนกรณีเจ็ทลำเดี่ยวคือ บริเวณจุดพุงชนมีการถ่ายเทความร้อน

ที่ต่ำกว่า เมื่อสโตว์ฮาล์วนัมเบอร์เพิ่มขึ้น และความปั่นป่วนความเร็วของเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ มีมากกว่าเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง และที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุงชนน้อย เมื่อเพิ่มความเร็ว การสั่นมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความถี่การสั่นของเจ็ทมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุงชนน้อยเหมือนเจ็ทลำเดี่ยวพุงชนพื้นผิวด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.48

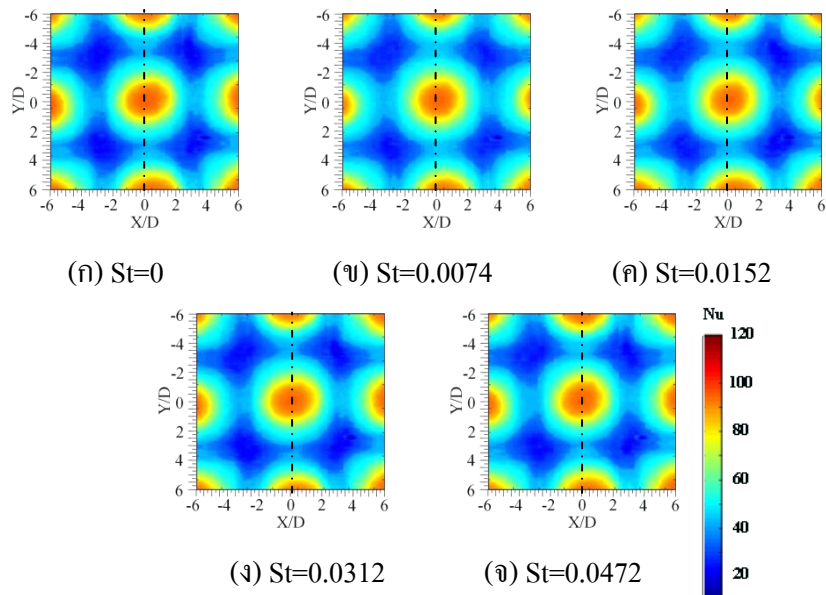


รูปที่ 5.47 แสดงการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุงชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)

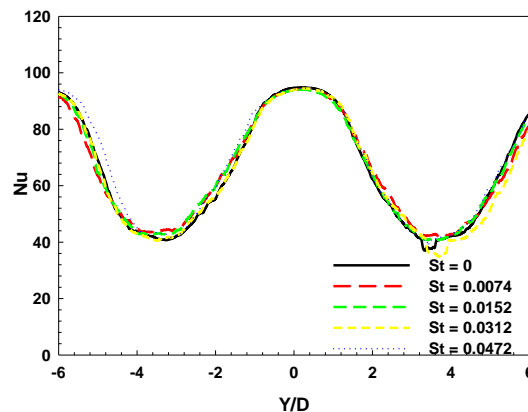


รูปที่ 5.48 แสดงการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกลุ่มเจ็ทพุงชน ที่สโตว์ฮาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S=6D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)

รูปที่ 5.49 แสดงการถ่ายเทความร้อนและการกระจายน้ำเซิลต์นัมเบอร์ที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่สโตวฮาวล์นัมเบอร์ต่าง ๆ พบว่า ที่เงื่อนไข $S=6D, L=6D$ ในกรณีการไหลแบบต่อเนื่อง $St=0$ เมื่อกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว และไหลตามผนังจะเกิดการชนกันของเจ็ทผนังระหว่างลำเจ็ท ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดำ เมื่อสโตวฮาวล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความปั่นป่วนของกลุ่มเจ็ทเพิ่มขึ้นและทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณเจ็ทผนังดีขึ้น การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากกรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ทมาก ทำให้ลักษณะการไหลเหมือนกับกรณีเจ็ทลำเดียว คือ ลักษณะการไหลแบบลูกคลื่นรบกวนการไหลและทำลายชั้นขอบเขตของการไหล และลดการชนกันของเจ็ทผนัง ทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 5.49 แสดงการกระจายน้ำเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6D, L=6D$ ($Re=12,000$)

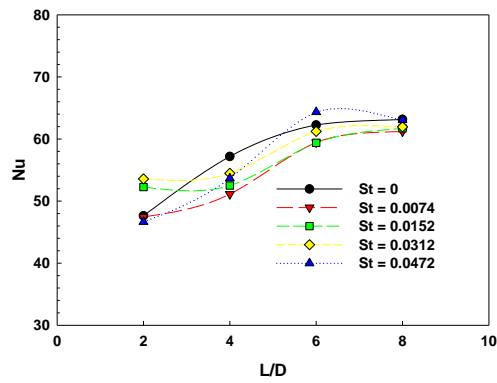


รูปที่ 5.50 แสดงการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่สโตวาฮาล์วนัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $S=6D$, $L=2D$ ($Re=12,000$)

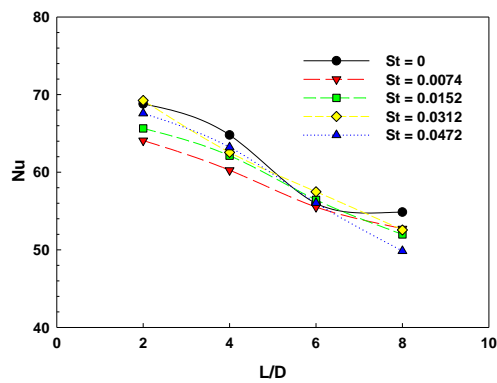
5.4.4 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวกรณีของกลุ่มเจ็ท

จากรูปที่ 5.51 แสดงค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวในช่วง $-6D \leq X, Y \leq 6D$ กรณีระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$ พบว่า สโตวาฮาล์วนัมเบอร์เพิ่มขึ้นทำให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ $L=6D$, $St=0.0472$ มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวสูงที่สุด ที่ระยะ $L=2D$ กรณี $St=0$, $St=0.0074$, $St=0.0472$ พบว่า มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวต่ำที่สุด รูปที่ 5.52 แสดงค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว กรณีระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=4D$ พบว่า ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่พุ่งชนกรณี $St=0.0312$ และ $St=0.0472$ มีค่าสูงกว่ากรณีเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไหลแบบต่อเนื่อง ที่ $St = 0.0312$ มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงกว่ากลุ่มเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง รูปที่ 5.53 แสดงค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว กรณีระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$ พบว่า ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวจะลดลงตามระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน และกรณีที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D$

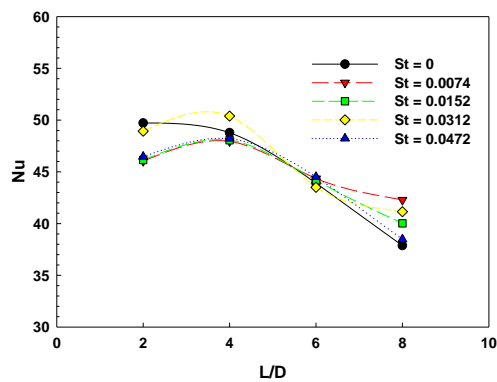
จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า ที่ระยะ $S=2D$ นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะ L ซึ่งแตกต่างจากกรณีระยะ $S=4D$ และ $6D$ พบว่า นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะ L และเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องได้เฉพาะบางตัวแปร เช่น (1) ที่ระยะ $S=2D$ ระยะ $L=2D$ ที่เงื่อนไข $St=0.0152$ และ 0.0312 , (2) ที่ระยะ $S=2D$ ระยะ $L=6D$ ที่เงื่อนไข $St=0.0472$, (3) ระยะ $S=4D$ ระยะ $L=6D$ ที่เงื่อนไข $St=0.0312$, (4) ระยะ $S=6D$ ระยะ $L=4D$ ที่เงื่อนไข $St=0.0312$, (5) เฉพาะที่เงื่อนไขระยะ $S=6D$ ระยะ $L=8D$ ทุกเงื่อนไขสโตวาฮาล์วนัมเบอร์ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง



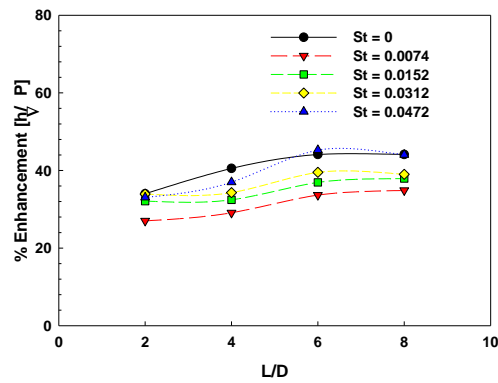
รูปที่ 5.51 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=2D$ ($Re=12,000$)



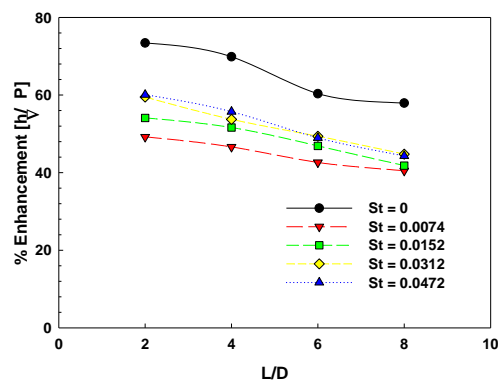
รูปที่ 5.52 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=4D$ ($Re=12,000$)



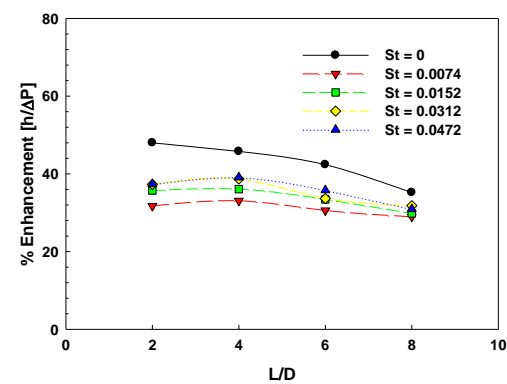
รูปที่ 5.53 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=6D$ ($Re=12,000$)



รูปที่ 5.54 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเงื่อนไขระยะ $S=2D$
($Re=12,000$)



รูปที่ 5.55 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเงื่อนไขระยะ $S=4D$
($Re=12,000$)



รูปที่ 5.56 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเงื่อนไขระยะ $S=6D$
($Re=12,000$)

รูปที่ 5.54-5.56 แสดงผลความสามารถในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน จากผลการทดลองทั้งหมดปรากฏว่า ความสามารถในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องสูงกว่าเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะทุกกรณี ยกเว้นที่เงื่อนไข $S=2D$, $L=6D$, $St=0.0472$

ในการทดลองครั้งนี้กรณีเจ็ทลำเดี่ยวและกลุ่มเจ็ทมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของพัดลม กรณีเจ็ทไหลต่อเนื่องมีประสิทธิภาพมากกว่ากรณีเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ แต่การเพิ่มกำลังของพัดลมในกรณีเจ็ทไหลแบบสั้นเป็นจังหวะทำให้ได้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง โดยการเพิ่มกำลังของพัดลมมีขนาดน้อยกว่าสองเท่าของกำลังพัดลมที่ใช้ในกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาแนวทางการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะพุ่งชน ในการทดลองแบ่งออกเป็นเจ็ทลำเดี่ยว และกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว และแบ่งย่อยการทดลองออกเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง และการไหลแบบสั้นเป็นจังหวะ สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ $Re=12,000$ ความถี่การสั้นของเจ็ท $f=0$ Hz, 4.5 Hz, 9.25 Hz, 19 Hz และ 28.5 Hz (สโตวฮาวล์นัมเบอร์ $St=0, 0.0074, 0.0152, 0.0312$ และ 0.0472 ตามลำดับความถี่การสั้น) ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน $L=2D, 4D, 6D$ และ $8D$ และระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=2D, 4D$ และ $6D$

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ใช้แผ่นเทอร์โมลิวอิโดคริสตัลวัดการกระจายของอุณหภูมิและวิเคราะห์การกระจายของน้ำสเชลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลได้ใช้วิธีฟิล์มน้ำมันเพื่อดูลักษณะการพุ่งชนบนพื้นผิวของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะ และศึกษาการไหลโดยใช้วิธีการจำลองการไหลโดยใช้วิธีการคำนวณพลศาสตร์การไหล ทำการวิเคราะห์การไหลแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient flow)

จากผลการศึกษารูปได้ดังนี้

(1) กรณีเจ็ทลำเดี่ยวพุ่งชนพื้นผิว จากการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพบว่า เจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง และเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะมีลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทใกล้เคียงกัน แต่ความปั่นป่วนความเร็วกรณีเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะมีค่าสูงกว่า ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะมีค่าสูงกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง ที่ตำแหน่งจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=6D, St=0.0312$ (เพิ่มขึ้น 2.93%) และ $S=0.0472$ (เพิ่มขึ้น 3.37%) โดยลักษณะของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะมีลักษณะการกระจายความเร็วเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดกระแสหมุนวนไหลบนผนัง สร้างความปั่นป่วนและרבกวนการไหลบนพื้นผิว และทำให้רבกวนชั้นขอบเขตของการไหลบนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพุ่งชนกรณีเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะสูงกว่าเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ยกเว้นกรณีระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=2D$ ความถี่การสั้นของเจ็ทมีอิทธิพลต่อการ

ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวน้อย ทำให้ที่ระยะ $L=2D$ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่องดีกว่าเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะ

(2) กรณีของกลุ่มเจ็ทจากการศึกษาพบว่า โครงสร้างของเจ็ทกลุ่มกรณีเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะมีลักษณะที่เหมือนกันเช่นเดียวกับกรณีเจ็ทลำเดี่ยว คือมีลักษณะการกระจายความเร็วเจ็ทใกล้เคียงกัน แต่ความปั่นป่วนของเจ็ทเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างรวดเร็วกรณีเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะมีค่ามากกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง คือเมื่อเพิ่มความถี่ของเจ็ทมากขึ้น มีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะสูงกว่าเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง กรณีระยะห่างจากปากจากปากทางออกถึงพื้นผิวพุ่งชน $L=6D$, $S=4D$, $St=0.0312$ (เพิ่มขึ้น 2.71%) และ $L=6D$, $S=6D$, $St=0.0074$ (เพิ่มขึ้น 1.01%) และ $St=0.0472$ (เพิ่มขึ้น 1.38%) และ $L=8D$, $S=6D$, $St=0.0074$, 0.0152 , 0.0312 และ 0.0472 (เพิ่มขึ้น 11.61%, 5.64%, 8.63%, 1.57% ตามลำดับ) และกรณีระยะห่างระหว่างลำเจ็ทต่อลำเจ็ท $S=2D$ ผลของความถี่การสั่นของเจ็ทที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวน้อย

(3) กรณีระยะห่างระหว่างลำเจ็ทของการทดลองกลุ่มเจ็ท จากการศึกษพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างลำเจ็ทเพิ่มมากขึ้นทำให้พฤติกรรมการไหลของเจ็ทเกิดการชนกันระหว่างเจ็ทผนัง ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณเจ็ทผนังมีค่าต่ำกว่ากรณีการไหลแบบต่อเนื่อง แต่ในกรณีการไหลแบบเป็นจังหวะ มีพฤติกรรมการไหลและหยุดสลับไปมา ทำให้ลดการชนกันระหว่างเจ็ทผนัง และลดชั้นขอบเขตของการไหลระหว่างลำเจ็ททำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวบริเวณเจ็ทผนังกรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบเป็นจังหวะสูงกว่ากรณีกลุ่มเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลการเพิ่มความถี่การสั่นของเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ในการไหลของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะมีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวใกล้เคียงกัน แต่พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบเป็นจังหวะมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเท่ากับสองเท่าของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง และประหยัดพลังงานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องกรณีให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเท่ากัน ควรใช้ประโยชน์จากจุดนี้ในการเพิ่มความถี่ในการถ่ายเทความร้อนในกรณีต้องการพื้นที่การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่กว้าง

บรรณานุกรม

- [1] Jun-Jie Zhou, Wen-Quan Tao, (2005), Three dimensional numerical simulation and analysis of the airside performance of slotted fin surfaces with radial strips, *Engineering Computations*, Vol.22, Iss: 8, pp.940 – 957
- [2] Douglas, J. F., Gasiorek, J. M., and Swaffield, J. A. Longman, (1995), “Fluid Mechanics”, pp. 327-332
- [3] Storey, B. D. and Jacobi A. M., (1999), The effect of streamwise vortices on the frost growth rate in developing laminar channel flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.42, Issue 20, pp. 3787–3802
- [4] Makatar, W., (2009), “Heat transfer Enhancement on a Surface Using Some Swirling Jets”, Prince of Songkla University
- [5] Zuckermann, N. and Lior, N., (2006), Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling, *Advanced heat transfer*, Vol. 39, ISSN 0065-2717
- [6] 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
- [7] Martin, H., (1977), Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces, *Adv. Heat Transfer* 13, pp. 1–60
- [8] Viskanta, R., (1993), Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 6, pp. 111–134
- [9] Maurel, S. and Sollicc, C., (2001), A turbulent plane jet impinging nearby and far from a flat plate, *Exp. Fluids* 31, pp. 687–696
- [10] Abe, K. and Suga, K., (2001), Large eddy simulation of passive scalar in complex turbulence with flow impingement and flow separation, *Heat Transfer – Asian Res.* 30, pp. 402–418
- [11] Cooper, D., Jackson, C., Launder, B. E. and Liao, G. X., (1993), Impinging jet studies for turbulence model assessment – I. Flow-field experiments, *Int. J. Heat Mass Transfer* 36, pp. 2675–2684
- [12] Zuckerman, N. and Lior, N., (2005), Impingement heat transfer: Correlations and numerical modeling. *J. Heat Transfer* 127, pp. 544–552

- [13] Han, J. C., Dutta, S., and Ekkad, S., (2000), "Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology", Taylor & Francis, New York
- [14] Gan, G. and Riffat, S. B., (1997). Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 14, pp. 160–165
- [15] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., and Whitney, C. F., (1997), Velocity and turbulence characteristics of a semi confined orthogonally impinging slot jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, pp. 60–67
- [16] Lee, J. and Lee, S., (2000), The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement. *Int. J. Heat Mass Transfer* 43, pp. 3497–3509
- [17] Mladin, E. C. and Zumbrennen, D. A., (1997), Local convective heat transfer to submerged pulsating jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, No.14, pp. 3305-3321
- [18] Patent US 8,199,505, (2012), jet impingement heat exchanger apparatus and power electronics modules
- [19] Patent US 6,000,908, (1999), Cooling for double-wall structures
- [20] Patent US 7,518,867, (2009), Electronic device cooling device and Electronic device cooling method
- [21] Patent US 6,334,330, 2002, Impingement cooling
- [22] 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
- [23] Hofmann, H. M., Movileanu, D. L. Kind, M. and Martin, H., (2007), Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3638-3648
- [24] Chaudhari, M., Puranik, B. and Agrawal, A., (2010), Heat transfer characteristics of synthetic jet impingement cooling, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1057-1069
- [25] 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

- [26] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S., (2007), "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [27] Storey, B. D. and Jacobi A. M., (1999), The effect of streamwise vortices on the frost growth rate in developing laminar channel flows, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.42, Issue 20, pp. 3787–3802
- [28] Ansys Inc., (2009), "Ansys fluent 12.0 theory guide", Canonsburg, Pennsylvania, United States

บรรณานุกรม

- [1] Jun-Jie Zhou, Wen-Quan Tao, (2005), Three dimensional numerical simulation and analysis of the airside performance of slotted fin surfaces with radial strips, *Engineering Computations*, Vol.22, Iss: 8, pp.940 – 957
- [2] Douglas, J. F., Gasiorek, J. M., and Swaffield, J. A. Longman, (1995), “Fluid Mechanics”, pp. 327-332
- [3] Storey, B. D. and Jacobi A. M., (1999), The effect of streamwise vortices on the frost growth rate in developing laminar channel flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.42, Issue 20, pp. 3787–3802
- [4] Makatar, W., (2009), “Heat transfer Enhancement on a Surface Using Some Swirling Jets”, Prince of Songkla University
- [5] Zuckermann, N. and Lior, N., (2006), Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling, *Advanced heat transfer*, Vol. 39, ISSN 0065-2717
- [6] 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
- [7] Martin, H., (1977), Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces, *Adv. Heat Transfer* 13, pp. 1–60
- [8] Viskanta, R., (1993), Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 6, pp. 111–134
- [9] Maurel, S. and Sollicc, C., (2001), A turbulent plane jet impinging nearby and far from a flat plate, *Exp. Fluids* 31, pp. 687–696
- [10] Abe, K. and Suga, K., (2001), Large eddy simulation of passive scalar in complex turbulence with flow impingement and flow separation, *Heat Transfer – Asian Res.* 30, pp. 402–418
- [11] Cooper, D., Jackson, C., Launder, B. E. and Liao, G. X., (1993), Impinging jet studies for turbulence model assessment – I. Flow-field experiments, *Int. J. Heat Mass Transfer* 36, pp. 2675–2684
- [12] Zuckerman, N. and Lior, N., (2005), Impingement heat transfer: Correlations and numerical modeling. *J. Heat Transfer* 127, pp. 544–552

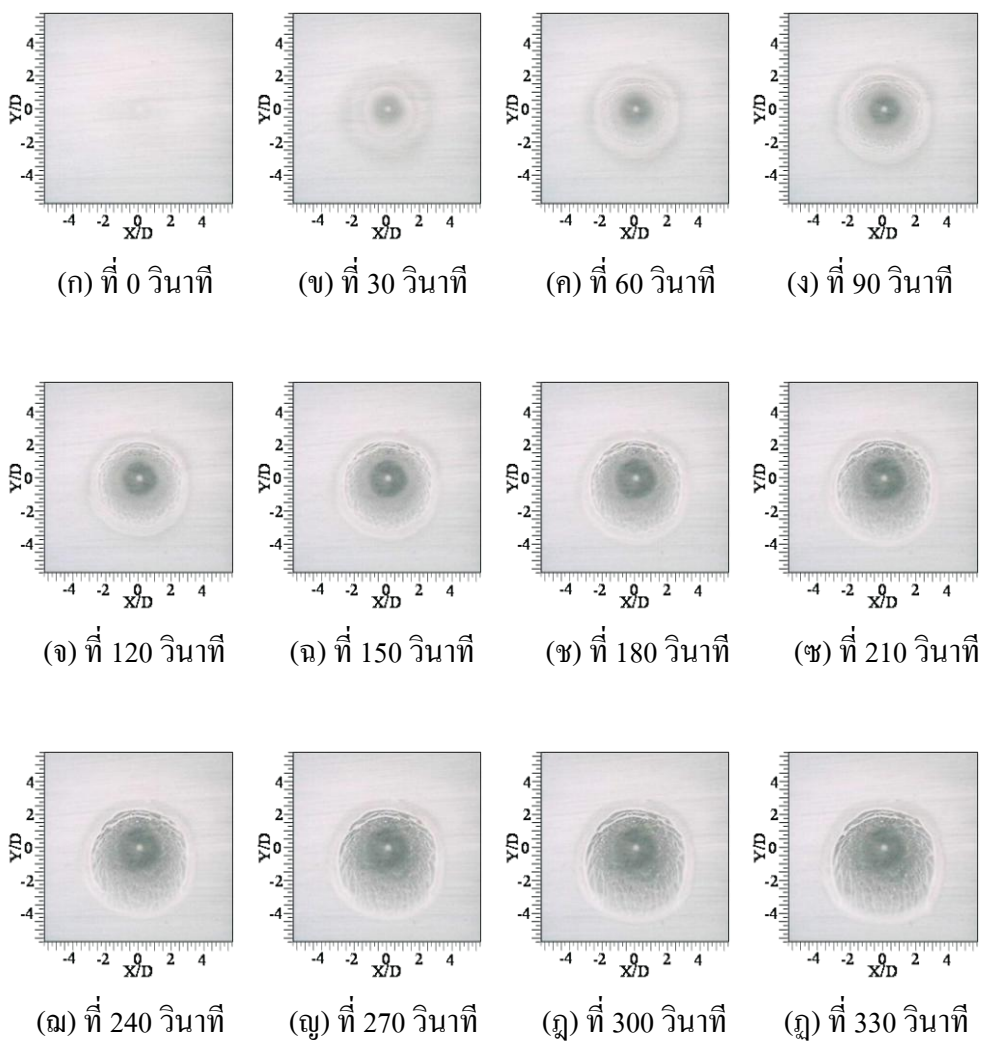
- [13] Han, J. C., Dutta, S., and Ekkad, S., (2000), "Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology", Taylor & Francis, New York
- [14] Gan, G. and Riffat, S. B., (1997). Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates, *Exp. Thermal Fluid Sci.* 14, pp. 160–165
- [15] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., and Whitney, C. F., (1997), Velocity and turbulence characteristics of a semi confined orthogonally impinging slot jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 14, pp. 60–67
- [16] Lee, J. and Lee, S., (2000), The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement. *Int. J. Heat Mass Transfer* 43, pp. 3497–3509
- [17] Mladin, E. C. and Zumbrennen, D. A., (1997), Local convective heat transfer to submerged pulsating jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, No.14, pp. 3305-3321
- [18] Patent US 8,199,505, (2012), jet impingement heat exchanger apparatus and power electronics modules
- [19] Patent US 6,000,908, (1999), Cooling for double-wall structures
- [20] Patent US 7,518,867, (2009), Electronic device cooling device and Electronic device cooling method
- [21] Patent US 6,334,330, 2002, Impingement cooling
- [22] 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
- [23] Hofmann, H. M., Movileanu, D. L. Kind, M. and Martin, H., (2007), Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3638-3648
- [24] Chaudhari, M., Puranik, B. and Agrawal, A., (2010), Heat transfer characteristics of synthetic jet impingement cooling, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1057-1069
- [25] 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

- [26] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S., (2007), "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [27] Storey, B. D. and Jacobi A. M., (1999), The effect of streamwise vortices on the frost growth rate in developing laminar channel flows, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.42, Issue 20, pp. 3787–3802
- [28] Ansys Inc., (2009), "Ansys fluent 12.0 theory guide", Canonsburg, Pennsylvania, United States

ภาคผนวก ก

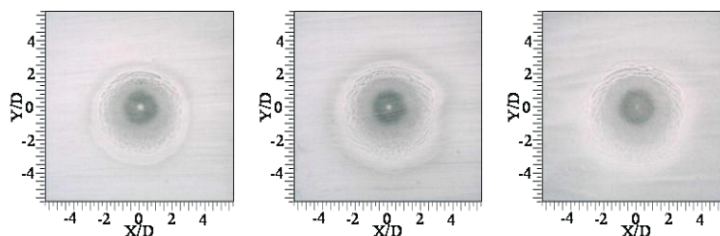
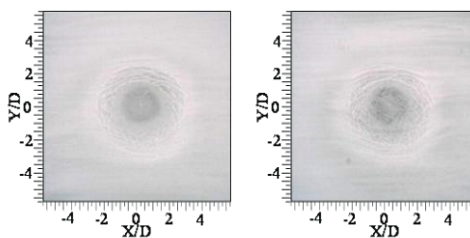
ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทบนพื้นผิวด้วยวิธีฟิล์มน้ำมัน

- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว
- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม



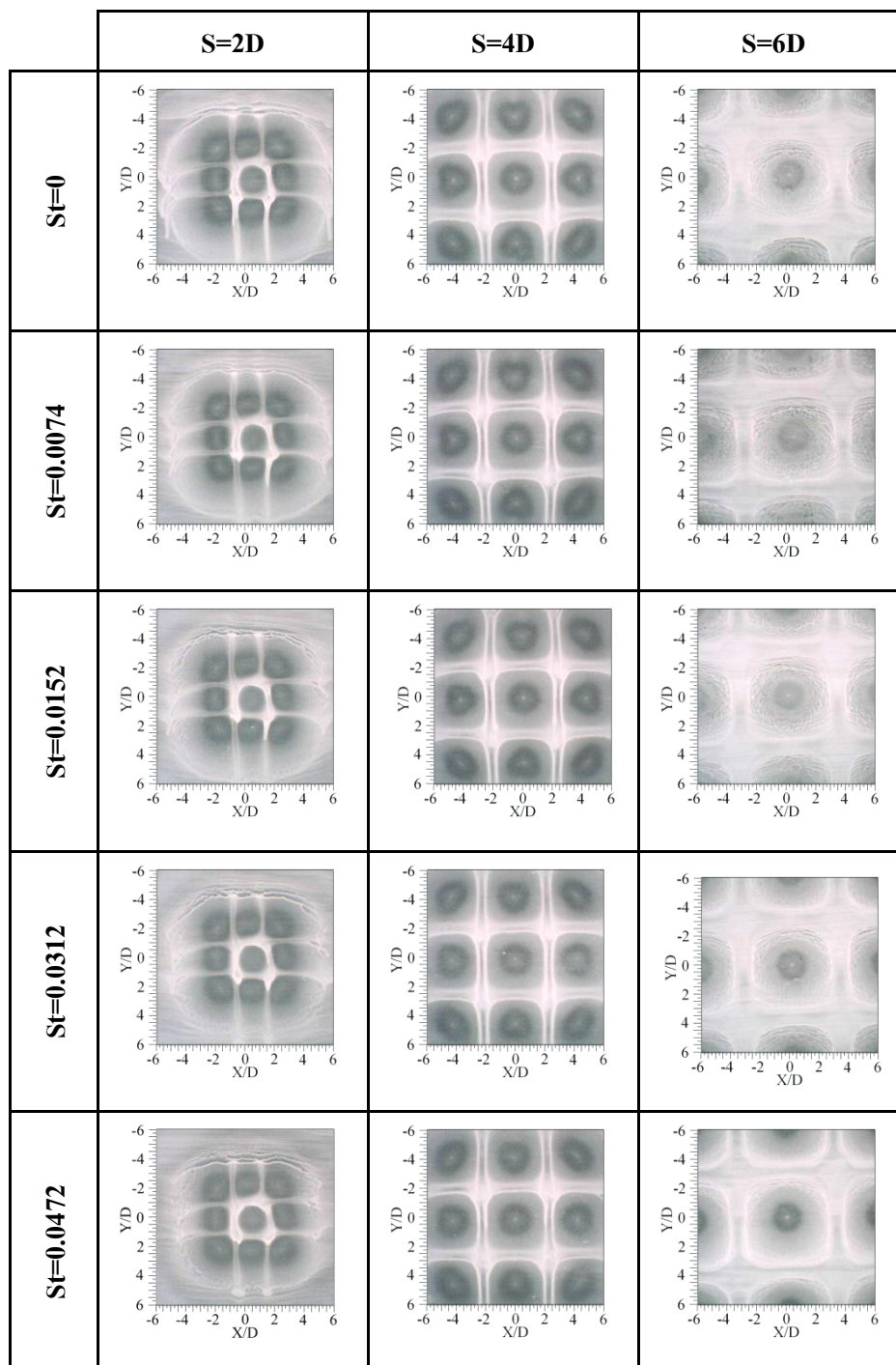
รูปที่ 1.ก แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวของเจ็ทลำเดียวที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว กรณีเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ($St=0$) ที่ระยะ $L=2D$ (ที่ $Re=12,000$)

- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจ็ทพัดพาออกจากพื้นผิว
- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม

(ก) $St=0$ (ข) $St=0.0074$ (ค) $St=0.0152$ (ง) $St=0.0312$ (จ) $St=0.0472$

รูปที่ 2.ก แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่เจ็ทลำเดียวพุ่งชนพื้นผิวที่สโตวฮาล์นัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $L=2D$ ระยะเวลาหลังจากเจ็ทพุ่งชน 150 วินาที (ที่ $Re=12,000$)

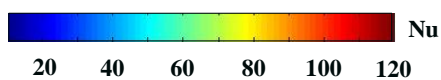
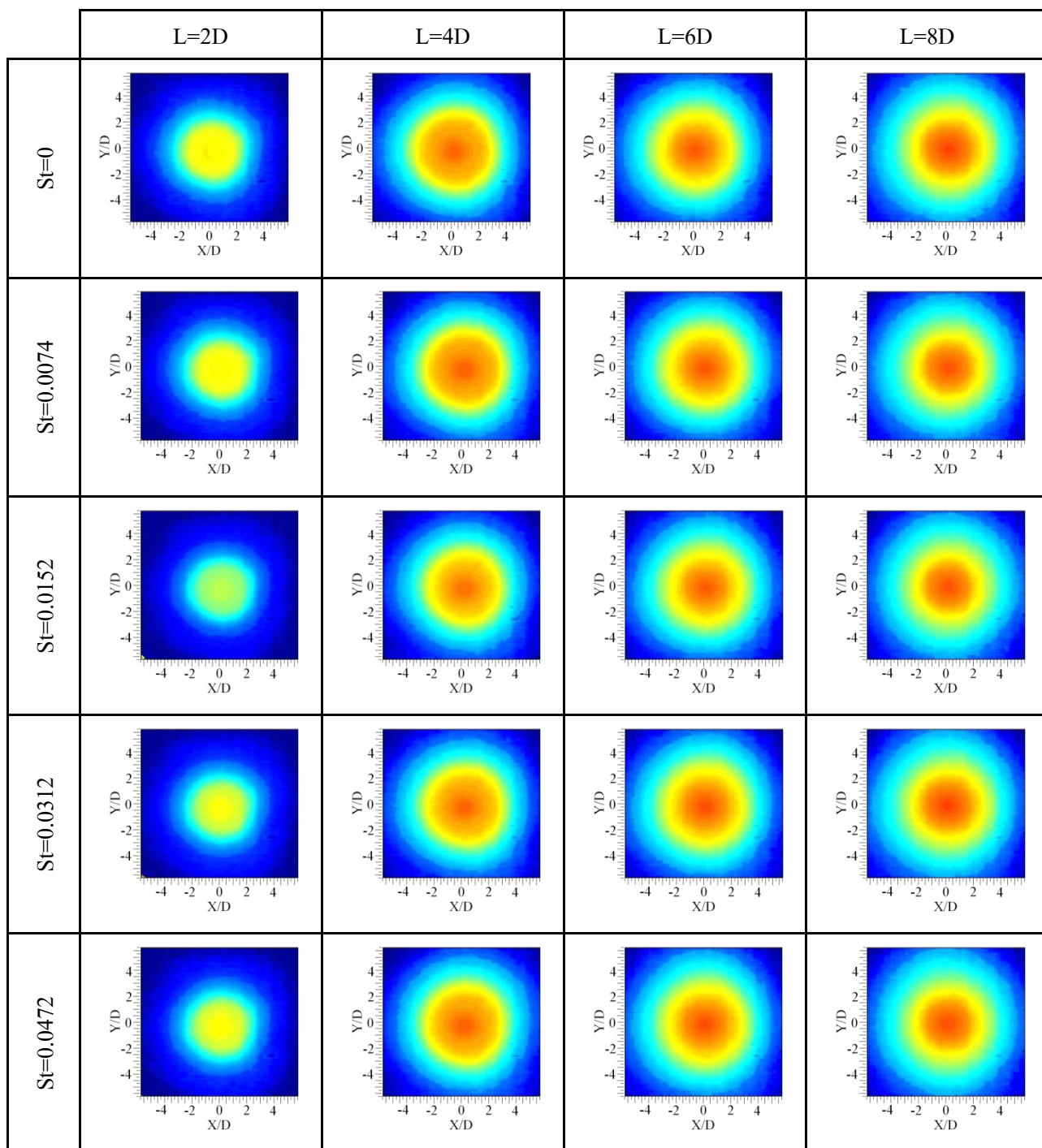
- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันถูกเจี๊พัดพาออกจากพื้นผิว
- บริเวณที่ฟิล์มน้ำมันสะสม



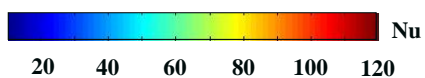
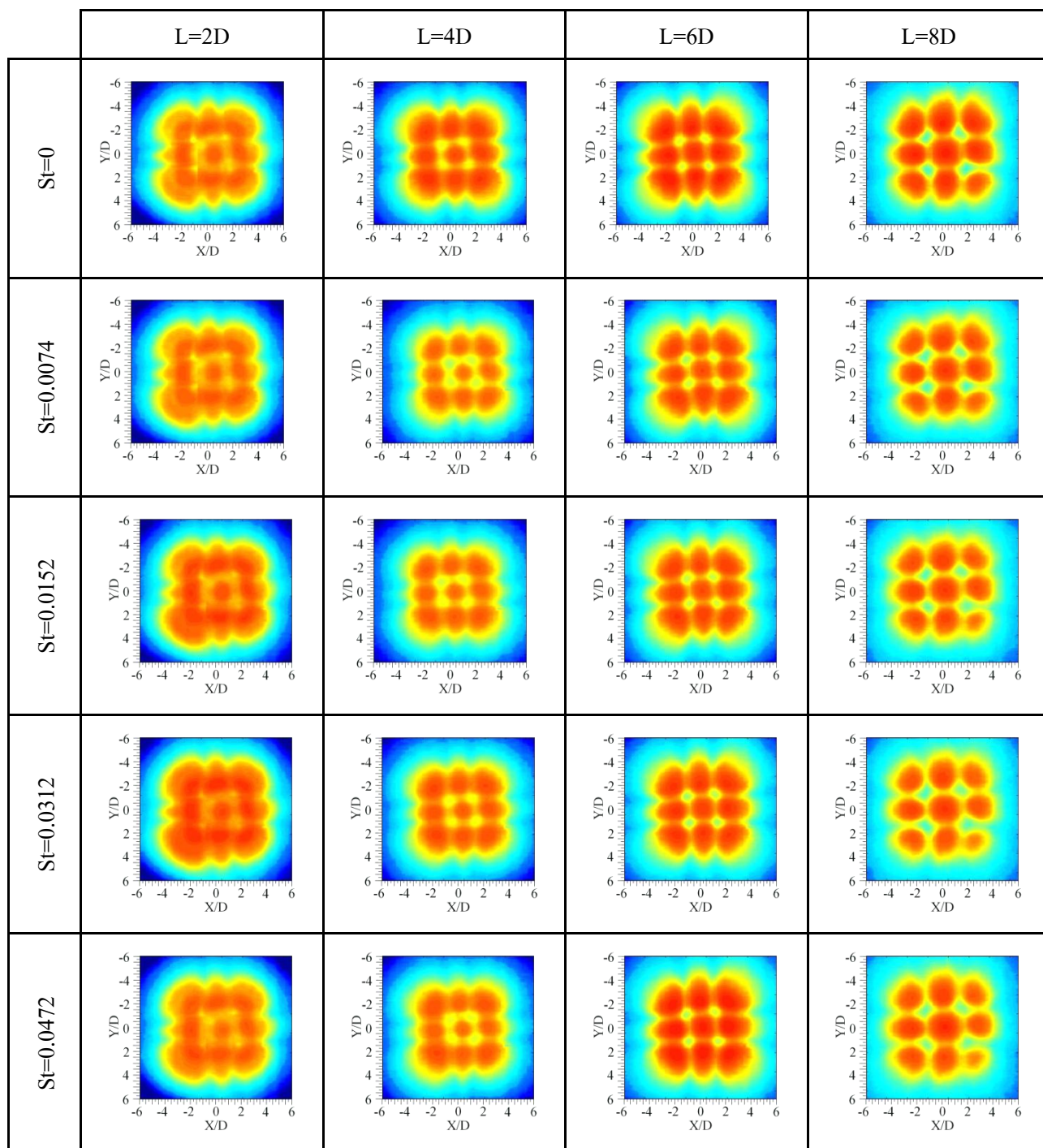
รูปที่ 3.ก แสดงการไหลของฟิล์มน้ำมันบนพื้นผิวที่กลุ่มเจี๊พុងชนพื้นผิวที่สโรว์ชาวลันัมเบอร์ต่าง ๆ ที่ระยะ $L=2D$ ระยะเวลาหลังจากเจี๊พុងชน 150 วินาที (ที่ $Re=12,000$)

ภาคผนวก ข

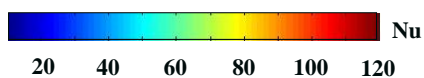
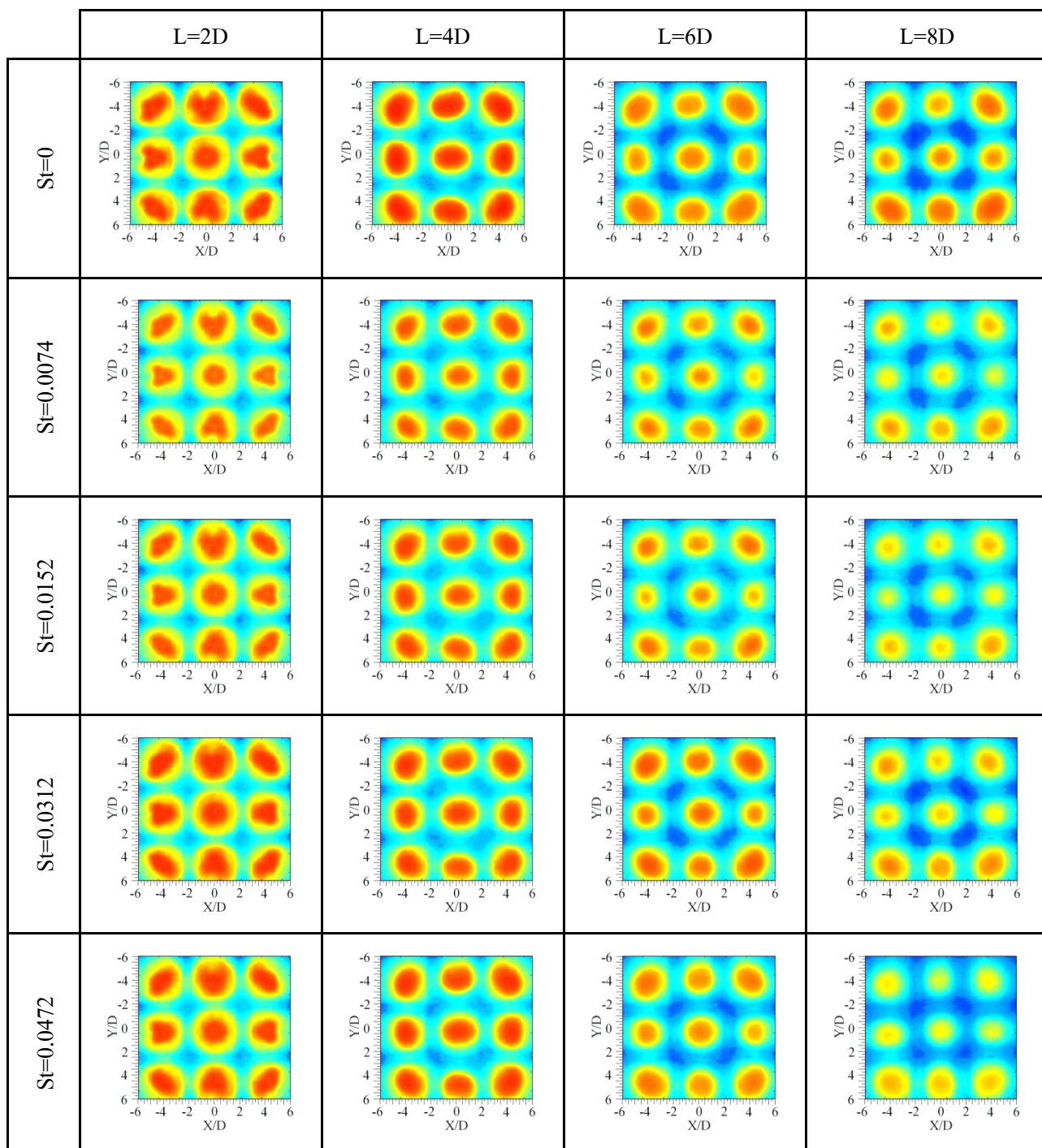
ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



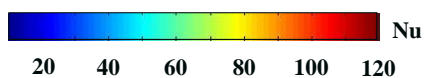
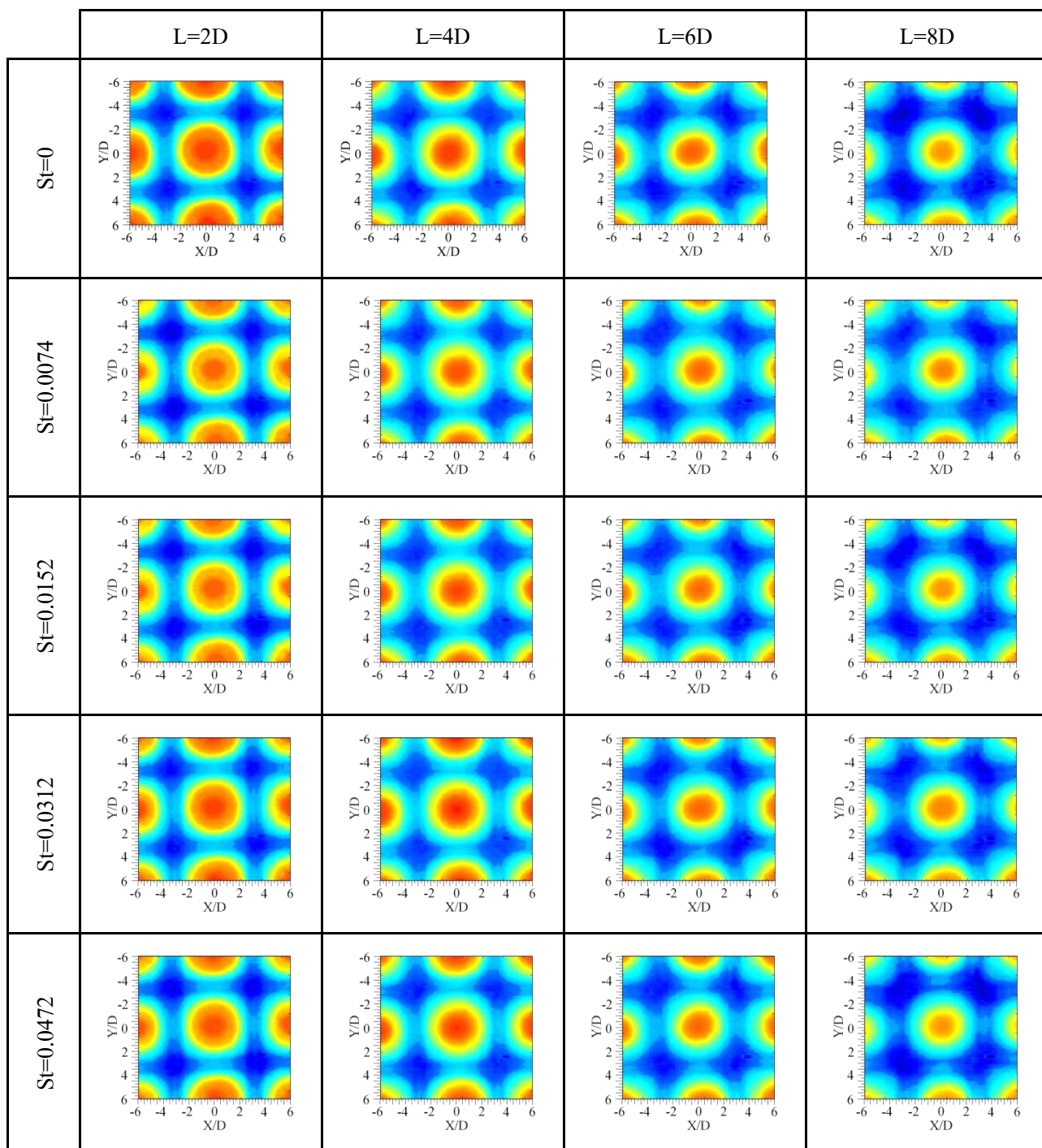
รูปที่ 1.ข แสดงการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชน กรณีเจ็ทลำเดียว



รูปที่ 2.ข แสดงการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชน กรณีกลุ่มเจ็ท ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=2D



รูปที่ 3.ข แสดงการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชน กรณีกลุ่มเจ็ท ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท S=4D



รูปที่ 4.ข แสดงการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวฟุ้งชน กรณีกลุ่มเจ็ท ที่ระยะห่างระหว่างลำเจ็ท $S=6D$

ภาคผนวก ก

บทความสำหรับเผยแพร่

อิทธิพลของการสั่นของการไหลเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว
ที่เจ็ทพุ่งชน

Effect of pulsating of jet flow on heat transfer on jet impinged surface

เอกพจน์ วิเชียร โชติ¹, กิตตินันท์ มลิวรรณ¹, มัถคาร์ แวหะยี¹ และ ชยุดนันท์ ทูลิต^{*1}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 074287035, โทรสาร: 074558830

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

บทคัดย่อ

การใช้ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวถูกนำมาใช้ในกระบวนการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนพื้นผิว ที่ต้องการอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง ในงานวิจัยนี้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศจากท่อเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเพื่อระบบ ระบายความร้อน ในการสร้างการสั่นของเจ็ทได้ใช้วิธีติดตั้ง Ball valve ต่อกับมอเตอร์ที่ควบคุมความเร็วในการหมุน ในการทดลองใช้ hot wire probe ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเจ็ทตามเวลา และใช้ smoke wire ในการดูโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่ใช้และใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน ในการวัดอุณหภูมิและหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากผลการทดลองพบว่า การไหลแบบสั่นเป็นจังหวะที่ Strouhal number $St = 0.032$, $L/D = 8$ และ $St = 0.024$, $L/D = 4$ มีค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดีที่สุด

คำสำคัญ: เจ็ทพุ่งชน, เจ็ทแบบสั่น, การถ่ายเทความร้อน, แผ่นเทอร์โมลิกควิดคริสตัล, เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน

Abstract

Impinging jet was used to cooling and heating processes which need high heat transfer rate on a surface. In this study, the heat transfer on impinged surface from pipe nozzle for cooling was studied. Pulsating jet was generated by ball valve connected to the motor controlled with inverter. Hot wire probe was used for velocity measurement with time. The flow structure of pulsating jet was visualized by smoke wire technique. Heat flux sensor was used for heat flux and temperature measurement and used to calculated heat transfer coefficient. It is found that the

pulsating jet with Strouhal number $St = 0.032$, $L/D = 8$ and $St = 0.024$, $L/D = 4$ gives the highest heat transfer rate.

Keywords: Impinging jet, Pulsating jet, Heat transfer, Thermochromic liquid crystal sheet, Heat flux sensor

1. บทนำ

เจ็ทพุ่งชนเป็นการบังคับให้ลำของไหลที่มีความเร็วหรือเจ็ทไหลปะทะกับพื้นผิวโดยตรง วิธีนี้ นิยมใช้ในระบบระบายความร้อนของใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ ผนังห้องเผาไหม้ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง โดยเฉพาะพื้นผิวบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว รวมถึงใช้ในการเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น อุปกรณ์ระบายความร้อนขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูง (Compact High Intensity Cooler, CHIC) เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการพยายามที่จะเพิ่มความสามรถการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้วิธีการควบคุมการไหลแบบต่างๆ การสร้างเจ็ทที่ไหลเป็นจังหวะก็เป็นอีกวิธีที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว [1, 2 และ 3] เนื่องจากการไหลบนพื้นผิวเป็นจังหวะจะทำให้กระแสการไหลหมุนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งกระแสหมุนวนจะเป็นตัวทำลายชั้นขอบเขตการไหลระหว่างของไหล

กับพื้นผิว ส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

Mladin และ Zumbrennen [1] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนแบบจังหวะโดยใช้บอลวาล์วเป็นตัวปิดและเปิดการไหลของอากาศจากการทดลองพบว่า ที่ระยะ $L = 3D-6D$ เจ็ทพุ่งชนแบบจังหวะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบต่อเนื่อง

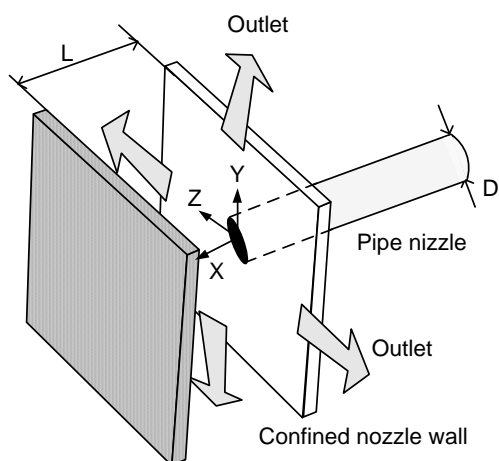
Hofmann และคณะ [4] ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนแบบจังหวะ ในการศึกษาได้พิจารณานัสเซลต์นัมเบอร์เฉพาะจุด (Local Nusselt number) ที่กระจายบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในกรณีที่ระยะ $L = 2D$ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ของเจ็ทพุ่งชนแบบจังหวะมีค่าสูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบต่อเนื่องเฉพาะแนวรัศมีที่เจ็ทพุ่งชนที่อยู่ในช่วง $r < 2D$ สำหรับที่รัศมีที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $r > 2D$ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ของเจ็ทพุ่งชนแบบต่อเนื่องและเจ็ทพุ่งชนแบบจังหวะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ เจ็ทไหลเป็นจังหวะพุ่งชน ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาอัตราการถ่ายเท

ความร้อนเฉลี่ยเฉพาะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) โดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วยโดยใช้วิธี Smoke wire ในการทดลองจะทำการปรับความถี่ของเจ็ทอยู่ในช่วง $f = 0-20$ Hz สำหรับระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $L = 2D-10D$ สำหรับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทที่ต่อเปล่ากำหนดให้คงที่ $Re = 5,000$

2. โมเดลและชุดทดลอง

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 1 แสดงโมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของโมเดลที่ใช้ในการทดลอง เจ็ทจะไหลออกจากหัวฉีดที่เป็นแบบท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D) 25.4 mm พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดลองจะกำหนดให้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมี

ฟลักซ์ความร้อนคงที่ และจะใช้เจ็ทที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำการระบายความร้อน (Cooling) สำหรับจุดกำเนิดของระบบพิกัดฉากอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท โดยแกน X มีทิศทางขนานกับท่อเจ็ทและ Y และ Z มีทิศทางขนานกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและตั้งฉากกับแนวศูนย์กลางท่อเจ็ทตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2

สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

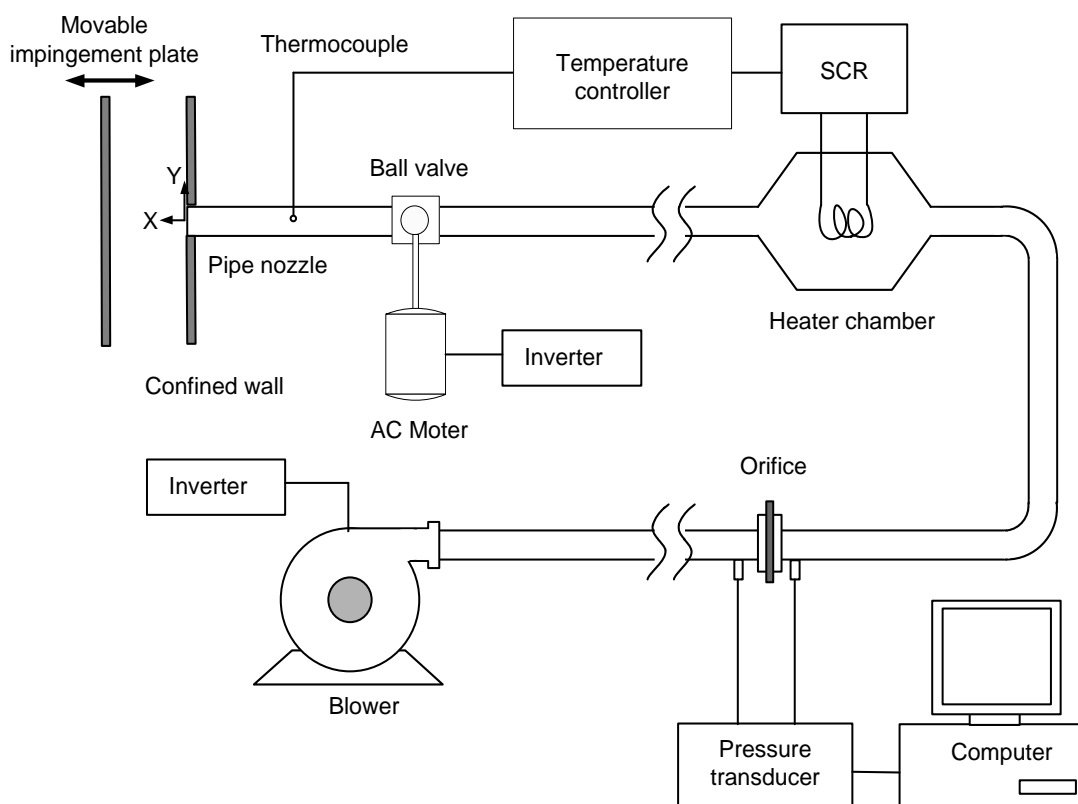
ประกอบด้วยระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $L = 2D, 4D, 6D, 8D$ และ $10D$ โดยทดลองเจ็ทที่เป็นแบบไหลต่อเนื่อง (steady jet) และเจ็ทที่ไหลเป็นแบบจังหวะ (pulsating jet) สำหรับการไหลของเจ็ทแบบจังหวะกำหนดให้อยู่ในช่วง $f = 0-20$ Hz โดยสามารถคำนวณค่า Strouhal number อยู่ในช่วง $0.00 < St < 0.041$ สำหรับเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่องกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ $Re = 20,000$ จากนั้นกำหนดให้เจ็ทที่ไหลเป็นจังหวะมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับความเร็วของเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง

2.2 ชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบรเวอร์ โดยควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วหลัก (main valve) และวาล์วรอง (By pass valve) หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านออรัลฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของ

เจ็ทอากาศให้คงที่ก่อนที่จะไหลออกจากท่อเจ็ทที่ออกแบบให้มีความยาวเพียงพอต่อการไหลที่เป็นแบบพัฒนาตัวแล้ว (Fully developed flow) จากชุดทดลองได้ทำการติดตั้งตะแกรงระหว่างท่อเจ็ทและห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทเพื่อให้อุณหภูมิของเจ็ทมีความสม่ำเสมอ ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออก

ของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ท (Confined wall jet) ไว้ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากที่เจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชนโดยชุดทดลองนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะพุ่งชนได้



รูปที่ 2 แสดงไดอะแกรมของชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดผ่านโบรเวอร์ โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย inverter หลังจากนั้นอากาศ

จะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และผ่านไปยังห้องควบคุมอุณหภูมิเจ็ทที่มีชุดฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ท อากาศให้คงที่ก่อนที่จะไหลออกจากท่อเจ็ทที่

ติดตั้ง ball valve แล้วพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในกรณีการไหลของเจ็ทแบบต่อเนื่องจะทำการปรับ ball valve ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดสุด สำหรับการสร้างเจ็ทที่ไหลแบบจังหวะจะทำการหมุนมอเตอร์ที่ต่อแกนเข้ากับ ball valve โดยสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย inverter ในการทดลองนี้ที่ปลายทางออกของท่อเจ็ทจะติดตั้งผนังของท่อเจ็ท (confined wall jet) หลังจากเจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน โดยชุดทดลองนี้ถูกออกแบบให้สามารถปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ และออกแบบให้สามารถถอดประกอบผนังที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อใช้ในการวัดความเร็วลม

3. วิธีการทดลอง

3.1 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน

รูปที่ 3 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน ผนังที่เจ็ทพุ่งชนทำมาจากแผ่นสแตนเลสแบบบาง (Stainless foil) ที่มีความหนา 0.03 mm ที่ถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลสแล้วใช้

เจ็ทที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำการระบายความร้อนบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสสำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนหาได้จากฟลักซ์ความร้อนเซนเซอร์ที่ติดบนแผ่นสแตนเลสที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นค่าเฉลี่ยที่วัดบนพื้นที่ของเซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนหาได้จากสมการเฉพาะจุดบนพื้นผิวได้จากสมการ

$$\bar{h}_{stagnation} = \frac{q}{(T_w - T_j)} \quad (1)$$

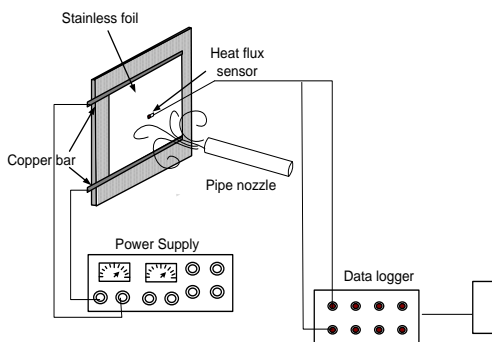
ในที่นี้ q คือฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน, T_w คืออุณหภูมิบนพื้นผิว และ T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทและนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu_{stagnation} = \frac{\bar{h}_{stagnation} D}{k} \quad (2)$$

ในที่นี้ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทและ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

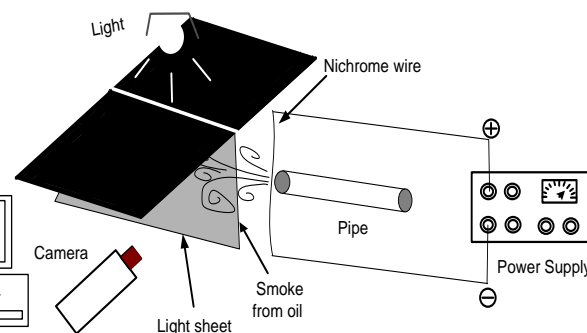
ในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในสมการที่ (1) ค่าฟลักซ์ความร้อนหาได้จากฟลักซ์ความร้อนเซนเซอร์ที่ติดอยู่บนแผ่นสแตนเลส อุณหภูมิบนพื้นผิวระบายความร้อนวัดจากเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ติดบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสตำแหน่งเดียวกับที่วัดฟลักซ์ความร้อน (ฟลักซ์ความร้อนเซนเซอร์และเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ในชุดเดียวกัน) สำหรับ

ผลจากการทดลองได้ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ หลังจากอุณหภูมิบนพื้นผิวเข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมที่ใช้ในการวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เซนเซอร์ฟลักซ์ความร้อน

เสร็จแล้วทำการบันทึกภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์ในการใช้ศึกษาลักษณะการไหลของของเจ็ทด้วยวิธี smoke wire

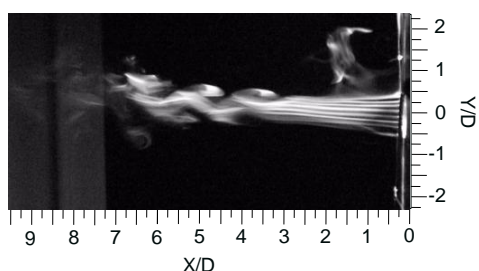
3.2 การวัดความเร็วเจ็ทและศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทด้วยวิธี Smoke wire

ในการวัดความเร็วเจ็ทได้ใช้ CTA (Constant temperature anemometer) โดยทำการสอบเทียบความเร็วโดยใช้ Pitot static tube ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทได้สร้างผนังที่มีช่องโปร่งแสง เป็นแนวยาวตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4 ด้านหลังของผนังได้ติดตั้งหลอดไฟสำหรับเป็นตัวกำเนิดแสง สำหรับด้านหน้าของผนังได้ติดตั้งลวดนิโครมและต่อไปยังเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ในการทดลองได้นำน้ำมันบนลวดนิโครมจากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านลวดนิโครมทำให้ลวดนิโครมเกิดความร้อนจนทำให้น้ำมันกลายเป็นควัน หลังจากที่เจ็ทไหลผ่านกลุ่มควันทำให้สามารถสังเกตลักษณะการไหลของ

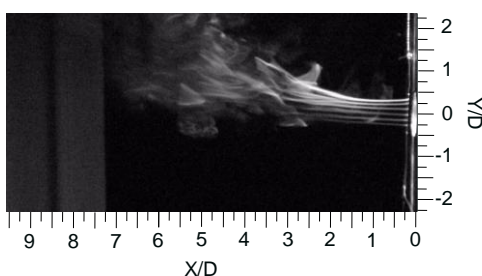
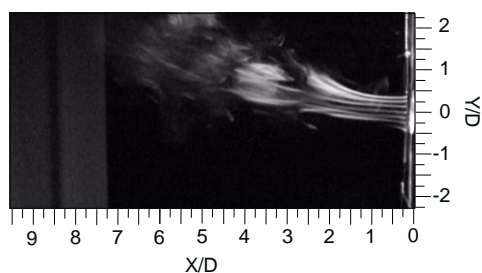
4. ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะการไหลของเจ็ท

จากรูปที่ 5 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทแบบไหลต่อเนื่องและไหลเป็นจังหวะ ในกรณีของเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง (รูปที่ 5 (ก)) ลักษณะการไหลของเจ็ทจะเป็นลำ จากนั้นที่ตำแหน่ง $X/D = 3.5$ เจ็ทเริ่มไหลเป็นแบบกระแสม้วนเนื่องจากเกิดการผสมกับอากาศที่อยู่รอบ ๆ สำหรับในกรณีการไหลของเจ็ทแบบจังหวะ (รูปที่ 5 (ข) และ (ค)) พบว่า ระยะที่เริ่มเกิดเป็นกระแสม้วน สั้นกว่าเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง (ระยะคิดจากปากทางออกเจ็ท) โดยความถี่ของเจ็ทเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะที่เกิดกระแสม้วนสั้นลง โดยระยะที่เริ่มเกิดเป็นกระแสม้วนเริ่มที่ $X/D = 3$ และ $X/D = 2.5$ สำหรับเจ็ทที่มีความถี่ในการสั้น $St = 0.008$ และ $St = 0.041$



(ก) เจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง

(ข) เจ็ทแบบไหลสั่นเป็นจังหวะ $St = 0.008$ (ค) เจ็ทแบบไหลสั่นเป็นจังหวะ $St = 0.041$

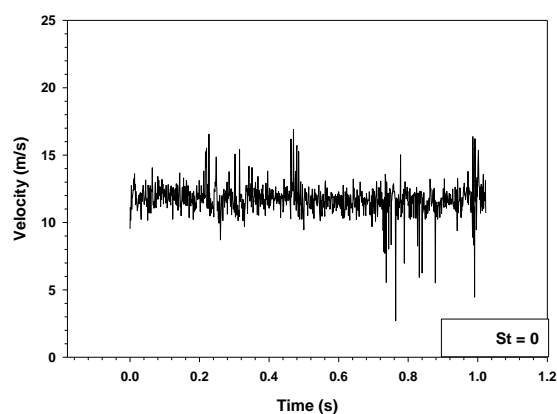
รูปที่ 5 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทแบบต่อเนื่องและเจ็ทไหลแบบจังหวะ

($Re = 5,000$)

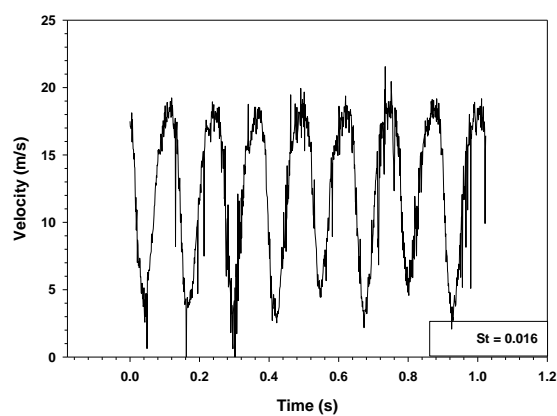
4.2 ผลจากการวัดความเร็วเจ็ท

จากรูปที่ 6 แสดงผลจากการวัดความเร็วเจ็ทที่อยู่ในช่วงความถี่ในการสั่นต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง (รูปที่ 6 (ก)) การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเกือบคงที่ โดยค่าเฉลี่ยของความเร็วอยู่ในช่วง 12

m/s ในกรณีการไหลของเจ็ทเป็นจังหวะ (รูปที่ 6 (ข)-(ค)) พบว่า แอมพลิจูดของความเร็วจะเพิ่มสูงกว่ากรณีของเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง สำหรับผลของแอมพลิจูดความเร็วของเจ็ทไหลแบบจังหวะพบว่า เมื่อค่า Strouhal number เพิ่มขึ้นจะทำให้คาบของการสั่นจะแคบลง

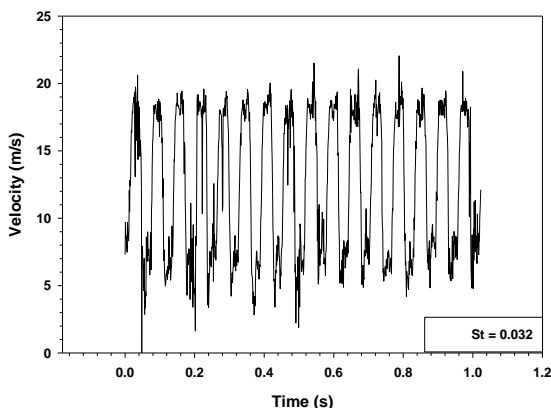


(ก) เจ็ทแบบไหลต่อเนื่อง

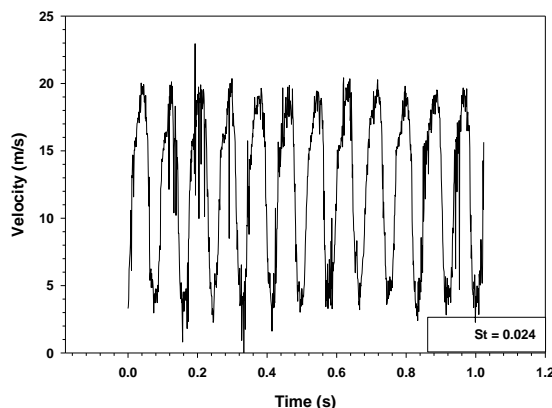


(ค) เจ็ทแบบไหลสั่นเป็นจังหวะที่

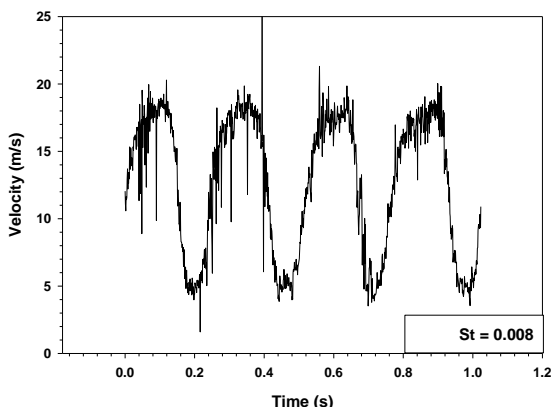
$St = 0.016$



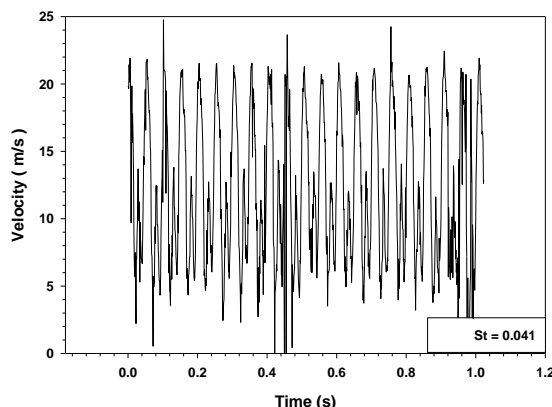
(จ) เจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะที่
St = 0.032



(ง) เจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะที่
St = 0.024



(ข) เจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะที่
St = 0.008



(ฉ) เจ็ทแบบไหลสั้นเป็นจังหวะที่
St = 0.041

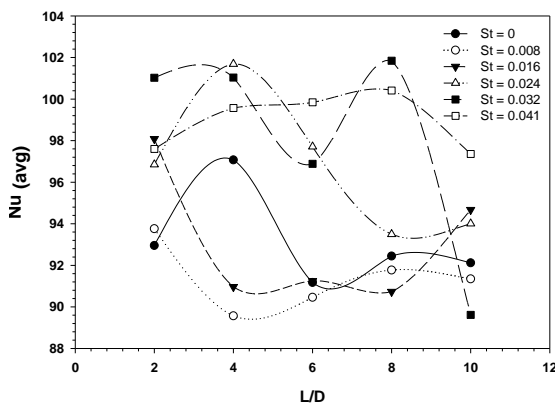
รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเจ็ทแบบไหลแบบต่อเนื่องและเจ็ทแบบไหลเป็นจังหวะ

4.3 ผลของระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน

รูปที่ 7 แสดงค่านัสเชิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน จากผลการทดลองพบว่า กรณีของเจ็ทไหลแบบต่อเนื่อง ค่านัสเชิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุด

เกิดขึ้นที่ระยะ $L/D = 4$ และค่านัสเชิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยลดลงเมื่อระยะ $L/D > 4$ ในกรณีเจ็ทที่ไหลแบบจังหวะพบว่า ผลของค่า Strouhal number อยู่ในช่วงที่ต่ำ ($St = 0.008$ และ 0.016) แนวโน้มของค่านัสเชิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำกว่าเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง ยกเว้นที่ระยะ $L/D = 2$

และในกรณีที่มีค่า Strouhal number อยู่ในช่วงที่สูง ($St > 0.016$) แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง และสำหรับที่เงื่อนไข $St = 0.032, L/D = 8$ และ $St = 0.024, L/D = 4$ มีค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด



รูปที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความถี่ในการไหลเป็นจังหวะของเจ็ท และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จากการศึกษาพบว่าเจ็ทที่ไหลเป็นจังหวะมีผลทำให้เกิดการผสมกับอากาศที่อยู่รอบๆ ได้เร็วกว่าเจ็ทที่ไหลแบบต่อเนื่อง และจากการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนพบว่า เจ็ทที่ไหลเป็นจังหวะที่เงื่อนไข $St=0.032, L/D=8$ และ $St = 0.024, L/D = 4$ มีค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

เอกสารอ้างอิง

[1] Mladin, E.C. and Zumbrunnen, D.A., (1997), Local convective heat transfer to submerged pulsating jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, No.14, pp. 3305-3321.

[2] Travnicek, Z. and Tesar, V., (2003), Annular synthetic jet used for impinging flow mass-transfer, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3291-3297.

[3] Chaudhari, M., Puranik, B. and Agrawal, A., (2010), Effect of orifice shape in synthetic jet based impingement cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, pp. 246-256.

[4] Hofmann, H. M., Movileanu, D. L. Kind, M. and Martin H., (2007), Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.50, pp. 3638-3.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายเอกพจน์ วิเชียร โชติ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5310120044		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551	

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เอกพจน์ วิเชียร โชติ และ ชยุต นันทคุลิต, 2553, “การอบแห้งยางธรรมชาติสำหรับผลิตยางแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟ”, การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกพจน์ วิเชียร โชติ, กิตตินันท์ มลิวรรณ, มัถคาร์ แวหะยี และ ชยุต นันทคุลิต, 2554, “อิทธิพลของการสั้นของการไหลเจ็ทที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน”, การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกพจน์ วิเชียร โชติ และ ชยุต นันทคุลิต, 2555, “การอบแห้งยางธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นยางแท่งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน”, การประชุมวิชาการถ่ายทอดผลงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 11, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่