



การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน
Study of Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets in
Rotating Flow Channel

ฐานทัฬ นนท์ตุลา
Thantup Nontula

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต 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

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน
Study of Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets in
Rotating Flow Channel

ฐานทัฬ นนท์ตุลา
Thantup Nontula

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต 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

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน
 ผู้เขียน นายฐานทัพ นนท์ตุลา
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

.....ประธานกรรมการ
 (ศาสตราจารย์ ดร.ฐานิตย์ เมธิยานนท์)

.....กรรมการ
 (ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

.....
 (ดร.มัทตาร์ แวหะยี)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมเครื่องกล

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟาร์รุ่งสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายฐานทัพ นนท์ตุลา)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายฐานทัพ นนท์ตุลา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน
ผู้เขียน	นายฐานทัฬ นนทศุลา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์กังหันแก๊สถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าและการขับเคลื่อนของอากาศยาน โดยปกติใบพัดกังหันแก๊สเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด เนื่องจากต้องทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่สูงและหมุนที่สภาวะความเร็วรอบสูง ทำให้มีโอกาสเสียหายจากภาวะความร้อนที่สูง ปัจจุบันอุณหภูมิที่ทางเข้าชุดกังหันแก๊สสูงกว่าอุณหภูมิที่วัสดุทำกังหันใบพัดจะทนได้ จึงต้องมีการระบายความร้อนในใบพัดกังหันแก๊สด้วยเพื่อป้องกันความเสียหาย การใช้เจ็ทพุ่งชนเป็นวิธีการระบายความร้อนภายในใบพัด โดยใช้กลุ่มของอากาศไหลปะทะผนังด้านในของใบพัด ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูง ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและการไหลของแก๊สเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุนรอบแกน เพื่อจำลองการระบายความร้อนของใบพัดกังหันแก๊สในสภาวะที่หมุน

ในการศึกษาใช้แก๊วของรูเจ็ทแบบออริฟิซที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=5$ mm จำนวน 13 รู ไหลปะทะกับผนังของช่องการไหลที่มีความกว้างของช่องการไหลและระยะห่างระหว่างรูเจ็ทที่ $S=4D$ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์สันัมเบอร์ของเจ็ทที่ $Re=6,000, 7,500$ และ $9,000$ ระยะจากทางออกรูเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D, 4D$ และ $6D$ ความเร็วรอบของการหมุนของช่องการไหล 0, 50, 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที (ภายใต้ตัวเลขการหมุน $R_o=0$ ถึง 0.0069) นอกจากนี้ศึกษาผลของทิศทางการหมุนของช่องการไหล 2 แบบ คือ ตามทิศการไหลของลำเจ็ทและตรงข้ามทิศการไหลของลำเจ็ท และรูปแบบทางออกของช่องการไหล 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบทางออกของช่องการไหลทางเดียวมีทิศทางการไหลเข้าหาแกนการหมุน รูปแบบทางออกของช่องการไหลทางเดียวมีทิศทางการไหลออกจากแกนการหมุน และรูปแบบทางออกของช่องการไหลแบบสองทางที่มีทิศไหลเข้าและออกจากแกนการหมุน สำหรับการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวใช้แผ่น Thermochromic Liquid Crystal (TLC) ที่มีสมบัติการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ภาพในการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ และศึกษาลักษณะการไหลด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent)

จากผลการศึกษาพบว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขรูปแบบทางออกของช่องการไหลแบบสองทางที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ ในกรณีหยุดนิ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะพุ่งชนและรูปแบบทางออกอื่น อีกทั้งให้การกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่

สมำเสมอที่สุด โดยที่เงื่อนไข $Re=9,000$ และระยะพุ่งชน $H=2D$ ให้ค่านัสเซลตันัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีของรูปแบบทางออกของช่องการไหลทางเดียวมีทิศทางการไหลเข้าหาแกนการหมุน และรูปแบบทางออกของช่องการไหลทางเดียวมีทิศทางการไหลออกจากแกนการหมุนเท่ากับ 10.17% และ 10.56% ตามลำดับ เนื่องมาจากรูปแบบทางออกของช่องการไหลที่มีทางออกสองทาง ส่งผลให้อากาศไหลออกจากช่องการไหลได้ดีกว่าและลำเจ็ทได้รับอิทธิพลจากกระแสไหลตัดน้อย สังเกตได้จากการไหลและความเร็วที่บริเวณปากทางออกเจ็ทมีความเร็วในแต่ละตำแหน่งเจ็ทที่ใกล้เคียงกัน ต่างจากอีกสองรูปแบบที่มีทางออกของช่องการไหลเพียงทางเดียว ที่ตำแหน่งเจ็ทบริเวณใกล้กับทางออกของช่องการไหลจะมีความเร็วสูงและรับอิทธิพลของกระแสไหลตัดทำให้ลำเจ็ทเอียงตัวออกไปมาก

ในกรณีที่ช่องการไหลมีการหมุน พบว่ารูปแบบทางออกแบบสองทางที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ แรงโคริโอลิสที่กระทำกับกระแสไหลตัดภายในช่องการไหลมีทิศทางหักล้างกัน มีเพียงแรงหนีศูนย์กลางที่ไม่ได้รับกวนการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่ระยะพุ่งชนต่ำ ทำให้ที่เงื่อนไขค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0037$ มีค่านัสเซลตันัมเบอร์เฉลี่ย ในกรณีการหมุนทิศทางเดียวกับการไหลลำเจ็ทและในกรณีการหมุนทิศทางตรงข้ามกับการไหลลำเจ็ทสูงที่สุดโดยเพิ่มขึ้น 7.87% และ 8.40% เมื่อเทียบกับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่งตามลำดับ

Thesis Title	Study of Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets in Rotating Flow Channel
Author	Thantup Nontula
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2019

ABSTRACT

Gas turbine engines are widely used in electric generation in power plants and jet propulsion in an aircraft engine. In general, the gas turbine blade is the most critical part, because it must operate under high temperatures and high-rotational speed conditions. This leads to damage from high thermal loads. Nowadays, the turbine inlet temperature (TIT) is higher than the melting point temperature of the blade material. Therefore, the blades of a gas turbine must have a cooling system to protect its damage. Impinging jet is one of the methods for internal turbine blade cooling by using an array of jets impinging on the internal wall of the blade, which gives high heat transfer rate. The main objective of this research is to study flow and heat transfer characteristics of impinging jets in the rotational channel to simulate the cooling system of gas turbine blades under rotation conditions.

In this study, a row of 13 orifice jet holes with diameter, $D = 5$ mm were used to impinge on the wall in a channel having width and pitch distance between orifices at $S = 4D$. The study parameters included jet Reynolds number $Re = 6,000, 7,500,$ and $9,000$, jet-to-impingement distance $H = 2D, 4D,$ and $6D$, rotational speed of the channel $N = 0, 50, 100, 150, 200,$ and 250 rpm (under rotation number $R_o=0$ to 0.0069). Besides, the effect of the rotation direction was studied for two types: same with jet flow direction and opposite to jet flow direction. And, three patterns of flow channel outlet were investigated: one-way flow exit and the flow direction toward the rotation axis, one-way flow exit and the flow direction outwards the rotation axis, and two-way flow channel exits and the flow direction towards and outwards the rotation axis. For heat transfer measurement, thermochromic liquid crystals (TLC) sheet which has a property of changing colour according to temperature was applied with image processing technique to evaluate temperature on the impingement

surface with constant heat flux. The flow characteristics were also investigated by the computational fluid dynamics software, ANSYS ver. 15.0 (Fluent).

The results show that the heat transfer characteristic of impinging jets in the case of a two-way flow exit pattern at the jet-to-impingement distance $H = 2D$ under stationary case ($R_o=0.0$) gave the highest of average Nusselt number when compared to other flow exit patterns and the different jet-to-impingement distances. Besides, it gave the most uniform Nusselt number distribution on the impingement surface. The average Nusselt number in the case of $Re = 9,000$ and impingement distance $H = 2D$ was higher than the case of one-way flow exit with flow direction towards the rotation axis and the case of one-way flow channel exit with flow direction outwards the rotation axis about 10.17% and 10.56%, respectively. Because the case of two-way flow exits gained well airflow and the jet flows were less influenced by the crossflow. This can be observed from the flow, and jet flow velocity at the exit had a similar velocity for each jet holes. On the other hand, the case of one-way flow exit at the jet position near the channel exit, the cross-flow had a high velocity and also gained the strong influence of the crossflow, causing the jet flow was bent significantly.

In the case of rotation, it was found that the two-way flow exits at the jet-to-impingement distance $H = 2D$, the Coriolis force acting on crossflow in the flow channel, was cancelled. Only the centrifugal force did not interfere with heat transfer in the flow channel at low impingement distance. For case of rotation number $R_o = 0.0037$, the average Nusselt number for rotation direction at the same direction and the opposite direction of the jet flow was the higher than about 7.87% and 8.40% when compared to the stationary case.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยเสนอแนะแนวทางและเสียสละเวลาในการดำเนินการทำวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมถึงการช่วยตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ ดร.มักตาร์ แวหะยี และศาสตราจารย์ ดร. ฐานิตย์ เมธิยานนท์ ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ บุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อทุนการศึกษาและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

นายฐานทัฬ นนท์ตุลา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(22)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	4
2.1.1 บริเวณเจ็ทอิสระ (Free jet zone)	4
2.1.2 บริเวณเจ็ทพุ่งชน (Impingement zone)	4
2.1.3 บริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet zone)	5
2.2 ตัวแปรที่ผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน	5
2.3 ผลของกระแสไหลตัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน	7
2.4 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน	8
2.5 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง	9
2.6 การวิเคราะห์แรงที่เกี่ยวข้อง	10
2.7 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	12
2.7.1 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทพุ่งชนระบายความร้อนและช่องการไหล	12
2.7.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่หมุน	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.3 สรุปการทบทวนเอกสาร	31
2.7.4 ช่องว่างงานวิจัย	31
บทที่ 3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย	32
3.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	32
3.2 ชุดทดลอง	36
3.3 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	39
3.4 การสอบเทียบสปีชีของแผ่นเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตัล	41
3.5 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	44
3.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลที่หมุน	45
3.6.1 สมการควบคุมการไหล	45
3.6.2 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model)	46
3.6.3 การสร้างโมเดลจำลองการไหล	50
3.6.4 การสร้างกริดและวิธีการคำนวณ	54
บทที่ 4 ผลการศึกษา	56
4.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลแบบหมุน	56
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีรูปแบบทางออก Single radius inward exit	56
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีรูปแบบทางออก Two-way exits	67
4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีรูปแบบทางออก Single radius outward exit	78
4.2 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลแบบหมุน	89
4.2.1 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างการทดลองกับการ จำลองการไหล	89
4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะการไหลกรณีรูปแบบทางออก Single radius inward exit	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะการไหลกรณีรูปแบบทางออก Two-way exits	94
4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะการไหลกรณีรูปแบบทางออก Single radius outward exit	97
4.3 การเปรียบเทียบค่าดัชนีเสถียรของเปลวไฟ	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	106
5.1 สรุปผลการทดลอง	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	108
ภาคผนวก ก ผลการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุนที่ $Re=6,000$ และ $7,500$	111
ภาคผนวก ข การคำนวณหาความไม่แน่นอนของผลลัพธ์จากการวัดการถ่ายเทความร้อน	148
ภาคผนวก ค บทความสำหรับเผยแพร่ 1	154
ภาคผนวก ง บทความสำหรับเผยแพร่ 2	161
ภาคผนวก จ บทความสำหรับเผยแพร่ 3	170
ประวัติผู้เขียน	182

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง	35
ตารางที่ 3.2	แรงที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตามค่าตัวเลขการหมุนที่ใช้ในการศึกษา	36
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน	51
ตารางที่ 3.4	การกำหนดรายละเอียดเงื่อนไขการคำนวณ	55

รายการภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1.1	วิวัฒนาการของอุณหภูมิทางเข้ากังหัน (TIT)	1
รูปที่ 2.1	โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุงชนบนพื้นผิว	5
รูปที่ 2.2	การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนต่างๆ (กรณีที่ใช้หัวฉีดแบบท่อและ $Re=23,750$)	6
รูปที่ 2.3	ปรากฏการณ์ที่เกิดระหว่างลำเจ็ทพุงชน	7
รูปที่ 2.4	การเกิดกระแสไหลของกลุ่มเจ็ทพุงชน	8
รูปที่ 2.5	การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสู่อากาศ	8
รูปที่ 2.6	แสดงการกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้ผนัง	10
รูปที่ 2.7	โมเดลของช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษา	12
รูปที่ 2.8	การเปรียบเทียบการกระจายตัวของเลขตัวเลขนัสเซิลต์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน	13
รูปที่ 2.9	อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างต่อการถ่ายเทความร้อน	15
รูปที่ 2.10	ผลของมุมเอียงต่อการถ่ายเทความร้อน	16
รูปที่ 2.11	การไหลอันดับสอง การไหลตามแนวแกน และการกระจายอุณหภูมิ ในช่องการไหลที่หมุน	17
รูปที่ 2.12	ของตัวเลขการหมุนต่ออัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์ ($Re=25,000$ และ อัตราส่วนความหนาแน่นเท่ากับ 0.13)	18
รูปที่ 2.13	ช่องการไหลหล่อเย็นภายในใบพัดแบบสี่เหลี่ยมของ Guidez	19
รูปที่ 2.14	ค่าอัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์ต่อตัวเลขการหมุนของ Guidez	19
รูปที่ 2.15	อัตราส่วนนัสเซิลต์นัมเบอร์ต่อตัวเลขเรย์ลีที่หมุนของ Guidez	19
รูปที่ 2.16	ภาพตัดของใบพัดและแบบจำลองส่วนทดสอบบริเวณส่วนหัวใบพัด	20
รูปที่ 2.17	รายละเอียดของส่วนทดสอบและแผ่นเจ็ท	20
รูปที่ 2.18	แผนภาพชุดทดลอง	21
รูปที่ 2.19	การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 RPM	22
รูปที่ 2.20	แผนภาพชุดทดลองทั้งระบบ	23

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 2.21	เปรียบเทียบการกระจายตัวของเลขน้สเซลท์ที่ เลขเรย์โนลด์เท่ากับ5,000	24
รูปที่ 2.22	รายละเอียดของส่วนทดสอบและทิศทางการไหลของของไหล	25
รูปที่ 2.23	แผนภาพชุดทดลอง	25
รูปที่ 2.24	การกระจายตัวของเลขน้สเซลท์ที่เลขเรย์โนลด์ 25,000, 50,000, 75,000, 100,000	26
รูปที่ 2.25	เปรียบเทียบอัตราส่วนตัวเลขน้สเซลท์ตามกับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างรูเจ็ท (Y/D)	26
รูปที่ 2.26	ส่วนทดสอบและรายละเอียด	27
รูปที่ 2.27	แผนภาพชุดทดลอง	27
รูปที่ 2.28	ทิศทางของความเร็วและแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้น	28
รูปที่ 2.29	เปรียบเทียบอัตราส่วนของตัวเลขน้สเซลท์ต่อระยะ	28
รูปที่ 2.30	การระบายความร้อนมาตรฐานที่ใช้ในใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไนน์ (ขวา)	29
รูปที่ 2.31	แสดงแผนภาพชุดทดลอง	29
รูปที่ 2.32	อัตราส่วนเลขน้สเซลท์กับตำแหน่งเจ็ทกรณีหยุดนิ่ง (บนขวา)	30
รูปที่ 2.33	การกระจายของตัวเลขน้สเซลท์กรณี (H/dj) เท่ากับ 2	30
รูปที่ 3.1	โครงสร้างการไหลและทิศทางของเจ็ทในใบพัดกังหัน	33
รูปที่ 3.2	โมเดลของช่องการไหล	34
รูปที่ 3.3	รูปแบบทางออกของช่องการไหล	35
รูปที่ 3.4	รายละเอียดชุดทดลองสำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชน ในช่องการไหลที่หมุน	36
รูปที่ 3.5	รายละเอียดชุดทดลองในส่วนการหล่อเย็น	37
รูปที่ 3.6	แสดงรายละเอียดชุดทดลองในส่วนการหมุน	38
รูปที่ 3.7	รายละเอียดชุดทดลองในส่วนการสร้างฟลักซ์ความร้อน	38
รูปที่ 3.8	รายละเอียดส่วนทดสอบที่ใช้วัดการถ่ายเทความร้อน	39

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.9	ชุดทดลองและตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบ	41
รูปที่ 3.10	การเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมครีมิคลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ	42
รูปที่ 3.11	กราฟสมการทำนายความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่า Hue	44
รูปที่ 3.12	การแปลงภาพถ่ายเป็นภาพการกระจายค่าน้ำสีเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว	44
รูปที่ 3.13	แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหล	51
รูปที่ 3.14	แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Single radius outward exit	52
รูปที่ 3.15	แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Single radius inward exit	53
รูปที่ 3.16	แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Two-way exits	53
รูปที่ 3.17	รายละเอียดการสร้างกริดกรณีรูปแบบทางออก Single radius outward exit	55
รูปที่ 4.1	การกระจายของค่าน้ำสีเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)	59
รูปที่ 4.2	ค่าน้ำสีเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)	60
รูปที่ 4.3	ค่าน้ำสีเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)	60
รูปที่ 4.4	การกระจายของค่าน้ำสีเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)	61
รูปที่ 4.5	ค่าน้ำสีเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)	62

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.6	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน H=4D เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)	62
รูปที่ 4.7	การกระจายของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)	63
รูปที่ 4.8	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน H=6D เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)	64
รูปที่ 4.9	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน H=6D เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)	64
รูปที่ 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน H=2D	65
รูปที่ 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน H=4D	66
รูปที่ 4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน H=6D	66
รูปที่ 4.13	การกระจายของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)	70
รูปที่ 4.14	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน H=2D เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.15	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)	71
รูปที่ 4.16	การกระจายของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)	72
รูปที่ 4.17	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)	73
รูปที่ 4.18	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)	73
รูปที่ 4.19	การกระจายของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)	74
รูปที่ 4.20	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)	75
รูปที่ 4.21	ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)	75
รูปที่ 4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=2D$	76
รูปที่ 4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=4D$	77
รูปที่ 4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=6D$	77

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.25 การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	81
รูปที่ 4.26 ค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	82
รูปที่ 4.27 ค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	82
รูปที่ 4.28 การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	83
รูปที่ 4.29 ค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	84
รูปที่ 4.30 ค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	84
รูปที่ 4.31 การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	85
รูปที่ 4.32 ค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	86
รูปที่ 4.33 ค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)	86
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=2D$	87

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน H=4D	88
รูปที่ 4.36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน H=6D	88
รูปที่ 4.37	ตัวอย่างการเปรียบเทียบการกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวระหว่าง การทดลองกับการจำลองการไหล ที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius inward exit	90
รูปที่ 4.38	การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์แสดงรวมกับการกระจายความเร็วและ เวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)	92
รูปที่ 4.39	การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์แสดงรวมกับการกระจายความเร็วและ เวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)	93
รูปที่ 4.40	การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์แสดงรวมกับการกระจายความเร็วและ เวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)	95
รูปที่ 4.41	การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์แสดงรวมกับการกระจายความเร็วและ เวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)	96
รูปที่ 4.42	การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์แสดงรวมกับการกระจายความเร็วและ เวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 9,000)	98
รูปที่ 4.43	การกระจายของค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์แสดงรวมกับการกระจายความเร็วและ เวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 9,000)	99
รูปที่ 4.44	ค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่ระยะฟุ้งชน H=2D, 4D และ 6D รูปแบบทางออก Single radius inward exit	104

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.45	ค่าน้ำสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่ระยพุงชน $H=2D, 4D$ และ $6D$ รูปแบบ ทางออก Two-way exits	104
รูปที่ 4.46	ค่าน้ำสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่ระยพุงชน $H=2D, 4D$ และ $6D$ รูปแบบ ทางออก Single radius outward exit	105

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

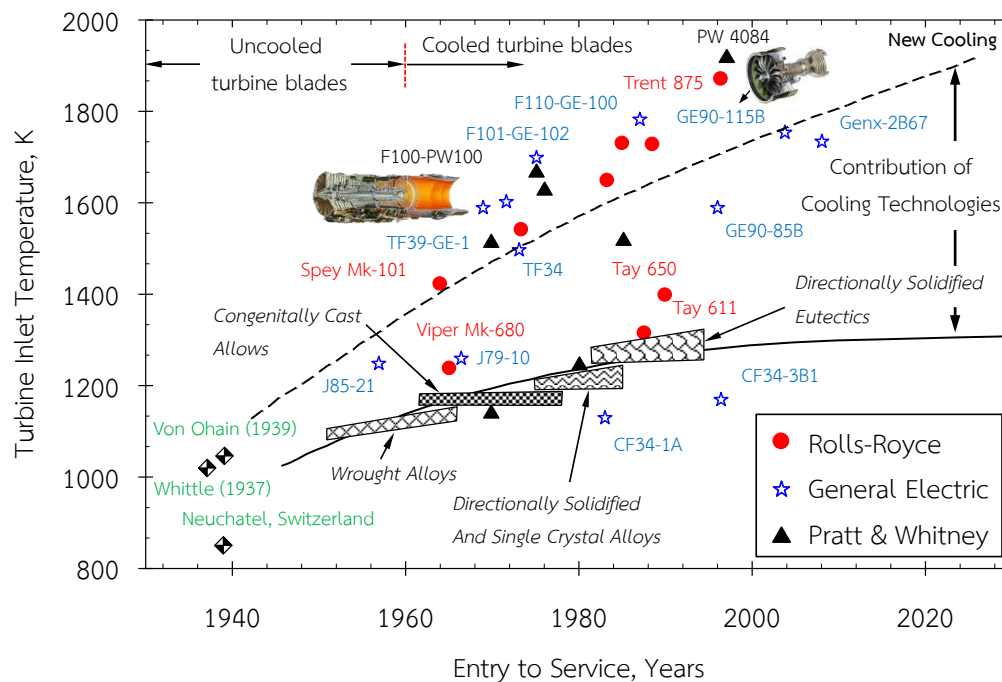
TLC	แสดงถึง	Thermochromic Liquid Crystal
\dot{q}	แสดงถึง	ฟลักซ์ความร้อน (kW/m^2)
h	แสดงถึง	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
A	แสดงถึง	พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
T_w	แสดงถึง	อุณหภูมิของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ($^\circ C$)
T_f	แสดงถึง	อุณหภูมิของของไหล ($^\circ C$)
Re	แสดงถึง	ตัวเลขเรย์โนลด์
R_o	แสดงถึง	ตัวเลขการหมุน
H	แสดงถึง	ความสูงช่องการไหล (m)
W	แสดงถึง	ความกว้างช่องการไหล (m)
L	แสดงถึง	ความยาวช่องการไหล (m)
D	แสดงถึง	เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (m)
I	แสดงถึง	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส (A)
V	แสดงถึง	แรงดันไฟฟ้า (Ω)
V_c	แสดงถึง	ความเร็วที่จุดศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ท (m/s)
ν	แสดงถึง	ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ (m^2/s)
ρ	แสดงถึง	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบถูกใช้งานอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งเป็นเครื่องยนต์ของอากาศยานที่อาศัยการสร้างของไหลที่มีความร้อนและความเร็วสูงออกทางด้านหลังเครื่องยนต์ทำให้เกิดแรงผลักไปข้างหน้า อีกทั้งยังถูกใช้เป็นตัวนำกำลังขับเคลื่อนเจนเนอเรเตอร์ (Generator) ในโรงไฟฟ้า นิยมใช้ในโรงไฟฟ้า Combined Cycle เนื่องจากแก๊สร้อนที่ออกจากเครื่องยนต์กังหันแก๊สสามารถนำมาขับกังหันไอน้ำ (Steam turbine) ได้ ส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์กังหันแก๊สประกอบไปด้วย Air Compressor ที่ทำหน้าที่อัดอากาศ เข้าไปยัง Combustion chamber ที่ทำหน้าที่จุดระเบิดทำให้เกิดการเผาไหม้ ส่งผลให้อากาศมีอุณหภูมิสูงและเกิดการขยายตัว อากาศร้อนที่จะถูกส่งนำไปขับ Turbine



รูปที่ 1.1 วิวัฒนาการของอุณหภูมิทางเข้ากังหัน (TIT) [1]

ปัจจุบันมีความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบให้สูงมากขึ้น เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยหนึ่งในวิธีที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบคือการเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหัน (Turbine Inlet Temperature: TIT) โดยวิวัฒนาการของการเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ถูกจำกัดไว้ด้วยอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบจึงต้องมีระบบระบายความร้อนโดยแบ่งเป็นการระบายความร้อนภายนอกใบพัดใช้ฟิล์มคูลิ่ง (Film cooling) และการระบายความร้อนภายในมีการใช้ เจ็ทพุงชน, การติดครีบสร้างความเป็นปวนในช่องการไหลวกกลับและใช้พินบริเวณส่วนท้ายของใบพัด เพื่อยืดอายุการใช้งานและให้ชิ้นส่วนภายในทำงานได้อย่างปลอดภัยในอุณหภูมิที่สูง

การใช้เจ็ทพุงชนเป็นการระบายความร้อนที่นิยมใช้ในใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ เนื่องจากการใช้เจ็ทพุงชนมีจุดเด่นตรงที่เป็นการระบายความร้อนเฉพาะจุดและเป็นการระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเหมาะสำหรับใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบที่มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง โดยในงานวิจัยได้มีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชน เช่น ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุงชน, การจัดเรียงของลำเจ็ท และ กระแสไหลตัด เป็นต้น อีกทั้งยังมีการศึกษาช่องการไหลที่หมุนเพราะในสภาวะการทำงานจริงของใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบมีผลกระทบจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) และ แรงโคริโอลิส (Coriolis force) ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนของการระบายความร้อนแบบเจ็ทพุงชนลดลง จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลที่หมุนเพื่อทราบถึงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนและนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาผลของความเร็วการหมุนของช่องการไหลที่มีผลต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนของแฉกเจ็ทพุงชน
- (2) ศึกษาผลของรูปแบบทางออกที่มีผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลที่หมุน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) ศึกษาเจ็ทพุงชนจากแผ่นออริฟิสแฉกเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) = 5 mm ระยะห่าง $S = 4D$ จำนวน 13 รู
- (2) ศึกษาระยะของการพุงชน $H = 2D, 4D$ และ $6D$ ตามลำดับ
- (3) ศึกษาในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 6,000, 7,500$ และ $9,000$ ตามลำดับ

(4) ศึกษาความเร็วรอบการหมุน $N = 0, 50, 100, 150, 200$ และ 250 ตามลำดับ อยู่ในช่วงค่าตัวเลขการหมุน $Re = 0$ ถึง 0.0069

(5) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว โดยใช้แผ่น Thermo-chromic Liquid Crystal (TLC)

(6) ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนโดยใช้โปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน

(2) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปทำการออกแบบการถ่ายเทความร้อนในใบพัดเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ ให้เพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่จะนำไปใช้ในงานวิจัย โดยเน้นถึงการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชน ทั้งนี้ในงานวิจัยเป็นการใช้เจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนจึงต้องศึกษาผลกระทบจากอิทธิพลของการหมุนต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนและกระแสไหลตัดที่รบกวนการไหลในช่องการไหล นอกจากนี้ได้มีการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องสำหรับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนและหยุดนิ่ง

2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือ ของไหลที่มีความเร็วพุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบ่งได้ 3 บริเวณ

2.1.1 บริเวณเจ็ทอิสระ (Free jet zone)

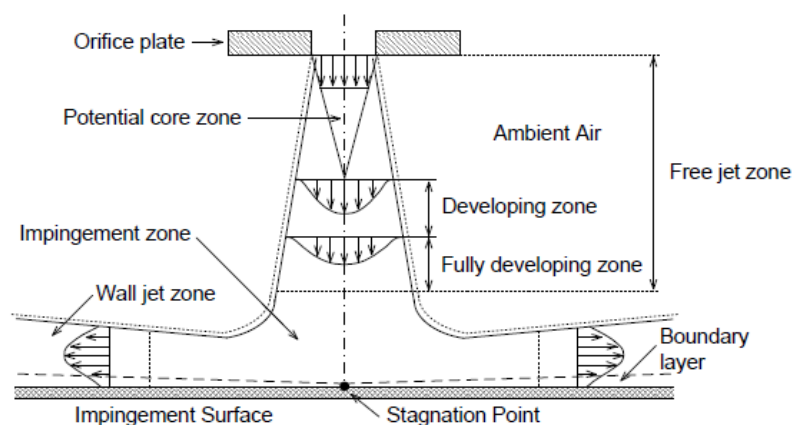
เป็นบริเวณที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของเจ็ทอิสระทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิว ซึ่งประกอบไปด้วย Potential core zone เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มออกจากปากทางออกโดยที่มีความเร็วใกล้เคียงกับที่ทางออกเจ็ท, Developing zone เป็นบริเวณการไหลช่วงพัฒนาตัวโดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ท และ Fully developing zone เป็นบริเวณที่เจ็ทมีการเปลี่ยนความเร็วอย่างสมบูรณ์แล้ว

2.1.2 บริเวณเจ็ทพุ่งชน (Impingement zone)

เป็นบริเวณเป็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยเมื่อของไหลเจ็ทเคลื่อนที่พุ่งชนเข้ากับพื้นผิว ความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเจ็ทพุ่งชนหรือ Stagnation point บนพื้นผิว หลังจากนั้นของไหลจะเคลื่อนที่กระจายออกรอบจุดศูนย์กลางของเจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมีบนพื้นผิวที่ปะทะ ภายในบริเวณนี้จะเกิดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเจ็ทจากตั้งฉากเป็นขนานกับพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอย่างกระทันหัน

2.1.3 บริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet zone)

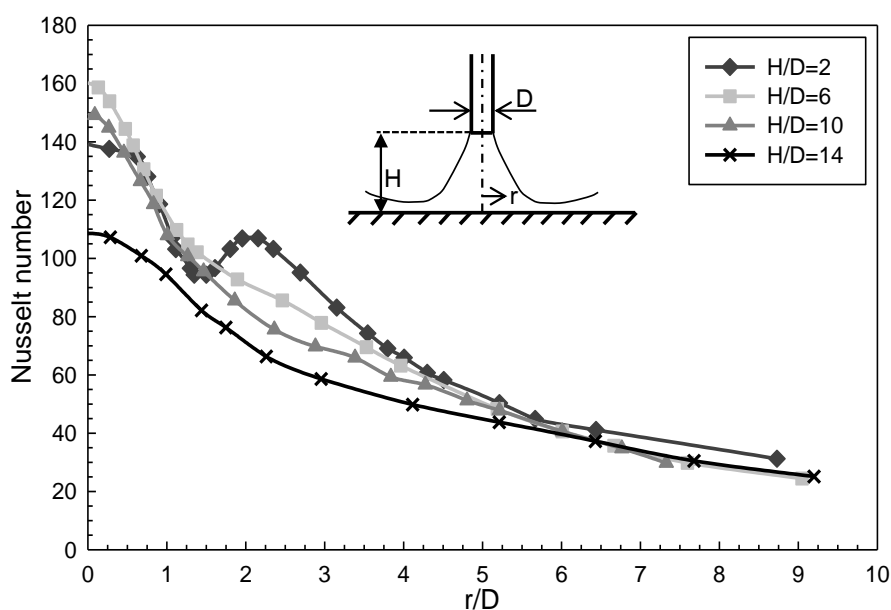
เป็นบริเวณที่เกิดการไหลบนพื้นผิวรอบบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement zone) บริเวณนี้เจ็ทจะมีความเร็วลดลงจนพบกับพื้นผิวส่งผลให้ชั้นขอบเขตการไหลบนผนังจะค่อยๆ หนาขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว [2]

2.2 ตัวแปรที่ผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน

โดยทั่วไปการไหลของเจ็ทพุ่งชนจะออกจากหัวฉีดด้วยความเร็วและเข้าปะทะกับพื้นผิว ซึ่งของไหลจะไหลเรียบตามพื้นผิวในแนวรัศมีของหัวฉีดทำให้เกิดการพาความร้อนทั่วทั้งพื้นผิว โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน เนื่องจากของไหลที่พุ่งออกจากเจ็ทเมื่อพุ่งชนบริเวณ Stagnation region จะมีการถ่ายเทโมเมนตัมกับพื้นผิวที่พุ่งชน อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มสูงที่สุดเมื่อมีระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เหมาะสมและโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนก่อนถึงพื้นผิว เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีค่าความปั่นป่วนและโมเมนตัมที่สูง อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนลดลงเมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวมีมากขึ้นเนื่องจากมีเพียงความปั่นป่วนที่มีค่าสูงซึ่งตามระยะพุ่งจากปากทางออกขึ้นพื้นผิวที่พุ่งชนแต่ค่าโมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวไม่ได้สูงตามค่าความปั่นป่วน [3,4]

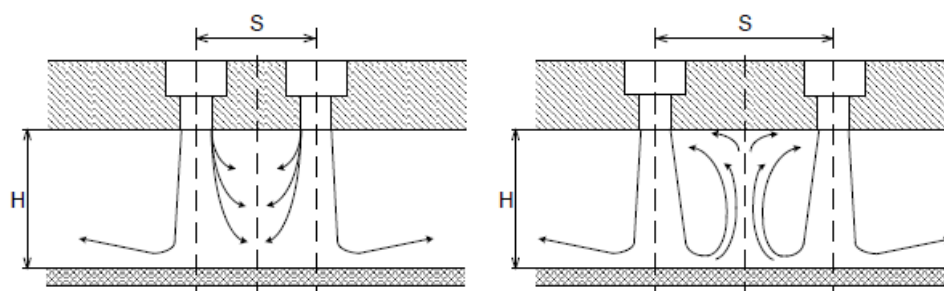


รูปที่ 2.2 การกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่างกัน (กรณีใช้หัวฉีดแบบท่อ ที่ $Re=23,750$) [5]

รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์ของลำเจ็ทเดี่ยวที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว โดยใช้หัวฉีดที่เป็นแบบท่อ (Pipe nozzle) ในรูปแสดงผลของระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) ต่อการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์ ตามแกนรัศมีของเจ็ท (r) กำหนดให้เรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทเท่ากับ $Re=23,750$ โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหัวฉีด จากรูปที่ 2.2 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D$ และจะค่อยๆลดลงแต่ที่ตำแหน่ง $r=1.5D$ อัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆเพิ่มอีกครั้งจนถึงตำแหน่ง $r=2D$ จะเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak) หลังจากนั้นเกิดการลดลงอย่างต่อเนื่องของอัตราการถ่ายเทความร้อน การเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak) นั้นอาจเกิดจากการที่เจ็ทเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรือเกิดขึ้นจากความเร่งของการไหลบนพื้นผิวหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วง $r=1D$ ถึง $2D$ หรืออาจเกิดจากก้อนการไหลหมุนวนขนาดใหญ่ (Large scale eddies) ในโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนทำลายชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น [5] แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน H มากกว่า $2D$ จากรูปที่ 2.2 พบว่านัสเซลต์นัมเบอร์ของแต่ละระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ท

พุงชนจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุงชน (Stagnation point) และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวแกนรัศมีของเจ็ท และนัสเซลต์นัมเบอร์บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุงชนมีค่าสูงสุดที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน $H=6D$ ซึ่งเป็นระยะที่โครงสร้างการไหลของเจ็ทในส่วนโพเทินเซียลคอร์กำลังจะหมดและระดับของความปั่นป่วนของเจ็ทเริ่มสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน H มากกว่า $6D$ เป็นระยะที่โมเมนตัมของเจ็ทที่พุงชนพื้นผิวลดลงตามระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุงชนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง

กรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่นั้นการใช้เจ็ทลำเดียวนั้นมีเพียงพอต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจึงต้องเจ็ทพุงชนแบบกลุ่มแทน กรณีใช้เจ็ทพุงชนแบบกลุ่มแทนทำให้โครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากลำเจ็ทที่อยู่ใกล้กันเกิดการผสมก่อนที่ลำเจ็ทจะพุงชนกับพื้นผิว [6] และจะเกิดการชนกันหลังจากลำเจ็ทพุงชนพื้นผิวของลำเจ็ทที่อยู่ใกล้กันอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.3



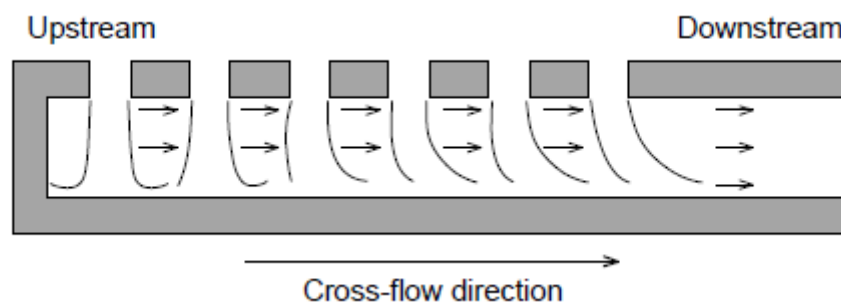
(ก) กรณีระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทน้อย

(ข) กรณีระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทมาก

รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์ที่เกิดระหว่างลำเจ็ทพุงชน [6]

2.3 ผลของกระแสไหลตัดการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชน

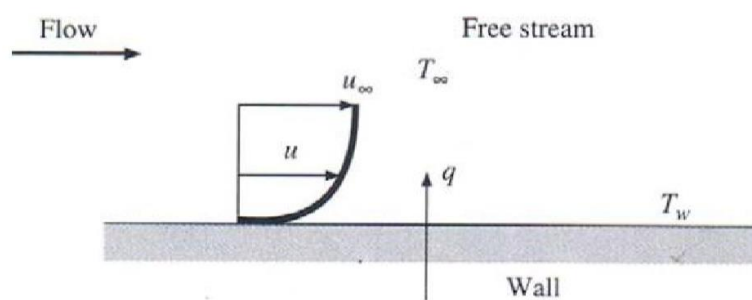
ลำเจ็ทพุงชนเกิดการรวมตัวหลังจากพุงชนพื้นผิวสะสมเกิดเป็นการไหลในช่องการไหลระกวางแผ่นเจ็ทและพื้นผิวที่ลำเจ็ทพุงชน เกิดเป็นกระแสไหลตัดกับลำเจ็ทในช่องการไหลโดยลำเจ็ทที่อยู่ใกล้ทางออกจะได้รับผลของกระแสไหลตัดสูง [7, 8] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กระแสไหลตัดจะทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ลำเจ็ทพุงชนบริเวณใกล้กับทางออกของช่องการไหลลดลง เป็นสาเหตุทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ เป็นข้อจำกัดของการใช้กลุ่มเจ็ทพุงชนพื้นผิวเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นผิว



รูปที่ 2.4 การเกิดกระแสไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน [7]

2.4 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชน

ในกรณีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทพุ่งชนจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ การถ่ายเทความร้อนด้วยของไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเรียกว่า การพาความร้อน ความเร็วของของไหลที่ผ่านวัตถุร้อน มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน พิจารณาดังรูปด้านล่าง เมื่อ T_w อุณหภูมิของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และ T_f อุณหภูมิของของไหล จากภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นความเร็วในการไหลของของไหล โดยจะมีค่าลดลงที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่ติดแน่นกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นความร้อนจึงถูกส่งผ่านด้วยการนำที่จุดนี้เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสู่อากาศ [9]

เมื่อความร้อนไหลด้วยการนำในชั้นที่ความเร็วของของไหลเท่ากับศูนย์ จะสามารถกล่าวได้ว่าเป็นการ ถ่ายเทความร้อนด้วยการพา ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิในชั้นนี้จะขึ้นกับความเร็วของของไหล ยิ่งความเร็วของ ของไหลมีค่ามาก ก็จะทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิที่มาก ผลเนื่องจากการพาทั้งหมด พิจารณาโดยใช้กฎการเย็นตัว ของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยการพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1)

ในการคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนด้วยกพาได้จากสมการ

$$\dot{Q} = hA(T_w - T_f) \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
 A คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
 T_w คือ อุณหภูมิของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ($^\circ C$)
 T_f คือ อุณหภูมิของของไหล ($^\circ C$)

2.5 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง

การไหลกรณีที่เป็นกรไหลขีดผนังโดยที่ผนังเป็นของแข็งจะมีความแตกต่างของโครงสร้างการไหลต่างจากการไหลปั่นป่วนแบบอิสระ จึงมีการวิเคราะห์เชื่อมโยงการไหลกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยระบบตัวแปรไร้มิติ สำหรับการไหลที่ของไหลขีดขอบผนังสามารถแบ่งได้เป็น 2 บริเวณหลัก บริเวณแรกคือ บริเวณชั้นใน (Inner layer) ซึ่งจะมีความหนาประมาณ 10% ถึง 20% ของชั้นความหนาขีดผิว ค่าความเค้นเฉือนมีความเสถียรเกือบไม่มีความเปลี่ยนแปลง และมีค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง τ_w ที่จะแบ่งเป็นอีก 3 ชั้นย่อย คือ Linear sub-layer ซึ่งความหนืดมีอิทธิพลหลักต่อการไหล ชั้นที่สอง Buffer layer ทั้งความหนืด และความปั่นป่วนมีอิทธิพลต่อการไหลในระดับเกือบเท่ากัน และชั้นที่สามคือ Log-law สำหรับบริเวณที่สองคือ บริเวณชั้นนอก (Outer layer) หรือ Law of the wake เป็นบริเวณที่ความเค้นเฉือนได้รับการบวกรวจากความปั่นป่วน อีกทั้งยังเป็นบริเวณที่เป็นอิสระต่อปัจจัยด้านความหนืดของของไหลและการไหลได้รับอิทธิพลของความเฉื่อยของการไหลเป็นหลัก และดังแสดงในรูปที่ 2.6

สมการตัวแปรไร้มิติของระยะห่างชั้นขีดผิว (Dimensionless wall distance, y^+) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$y^+ = \frac{yV_\tau}{\nu} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$V_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.3)$$

ความเร็วไร้มิติ (Dimensionless velocity) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$V^+ = \frac{V}{V_\tau} \quad (2.4)$$

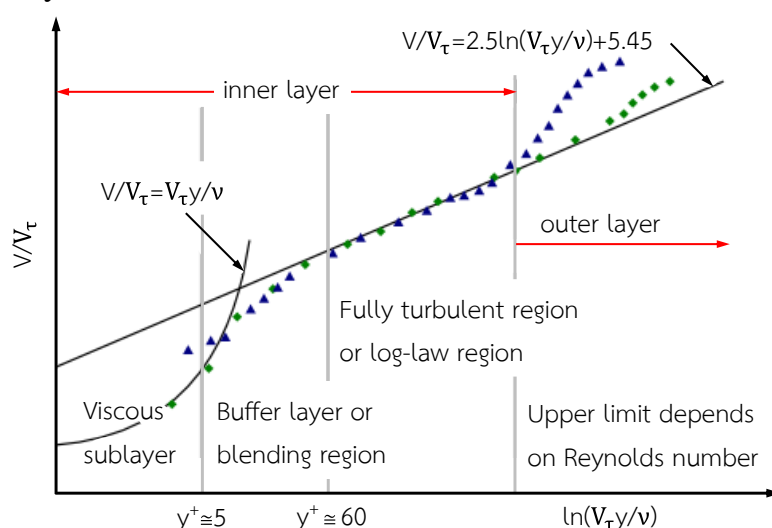
โดยที่

v คือ ความเร็ว (Velocity), m/s

V_τ คือ ความเร็วเฉือน (Shear velocity), m/s

τ_w คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress), N/m²

y คือ ระยะห่างจากชั้นขีดผนัง, m



รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้ผนัง [10]

2.6 การวิเคราะห์แรงที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในกรณีหยุดนิ่งจะมีแรงที่เกี่ยวข้องกับของไหลอยู่ 2 แรง ได้แก่ แรงเฉื่อย ($F_{inertial}$) และแรงหนืด ($F_{viscous}$) สามารถคำนวณจากสมการ

$$F_{inertial} = \rho V^2 D_h^2 \quad (2.5)$$

$$F_{viscous} = \rho \nu V D_h \quad (2.6)$$

อัตราส่วนระหว่างแรงทั้งสองสามารถแสดงในรูปของตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)

$$\frac{F_{inertial}}{F_{viscous}} = \frac{\rho V^2 D_h^2}{\rho \nu V D_h} = \frac{V D_h}{\nu} = \text{Re} \quad (2.7)$$

สำหรับในการณีนที่หมุนจะมีอีกสองแรงที่เกิดขึ้นในช่องการไหล ได้แก่ แรงโคริโอลิส (F_{cor}) และแรงลอยตัวแบบหมุน ($F_{buoyancy}$) สามารถคำนวณจากสมการ

$$F_{coriolis} = \rho \Omega V D_h^3 \quad (2.8)$$

$$F_{buoyancy} = g_{rotation} \Delta \rho D_h^3 \quad (2.9)$$

โดยที่ $g_{rotation}$ คือความเร่งหนีศูนย์กลาง กำหนดให้ $g_{rotation} = \Omega^2 r$

$$F_{buoyancy} = (\Omega^2 r) \Delta \rho D_h^3 \quad (2.10)$$

อัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวแบบหมุน ($F_{buoyancy}$) และแรงหนืด ($F_{viscous}$) คือ Grashof number (Gr)

$$Gr = \frac{F_{buoyancy}}{F_{viscous}} = \frac{\Omega^2 r \Delta \rho D_h^3}{\rho \nu V D_h} = (\text{Re}) R_o^2 (\text{DR}) \left(\frac{r}{D_h} \right) \quad (2.11)$$

อัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวแบบหมุน ($F_{buoyancy}$) และแรงเฉื่อย ($F_{inertial}$) คือตัวเลขลอยตัวแบบหมุน (B_o) ซึ่งเท่ากับ Gr / Re^2 ในกรณีหยุดนิ่ง

$$B_o = \frac{F_{buoyancy}}{F_{inertial}} = \frac{F_{buoyancy} / F_{viscous}}{F_{inertial} / F_{viscous}} = \frac{Gr}{\text{Re}} = \frac{r(\text{DR}) R_o^2}{D_h} \quad (2.12)$$

อัตราส่วนระหว่างแรงโคริโอลิส (F_{cor}) และแรงเฉื่อย ($F_{inertial}$) คือตัวเลขการหมุน (R_o)

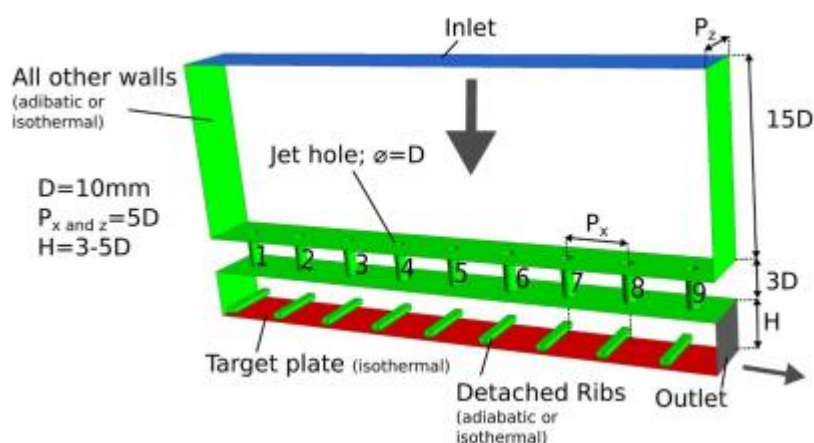
$$R_o = \frac{F_{cor}}{F_{inertial}} = \frac{\rho \Omega V D_h^3}{\rho V^2 D_h^2} = \frac{\Omega D_h}{V} \quad (2.13)$$

2.7 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทพุงชนระบายความร้อนและช่องการไหล

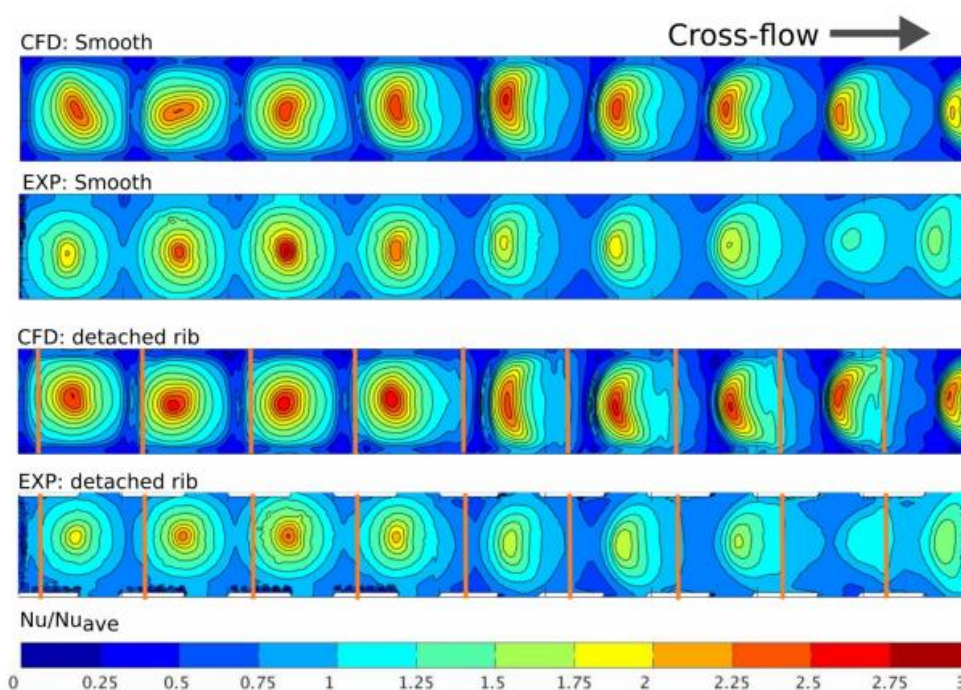
Chi และคณะ [11] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนแบบอาเรียโดยพยายามลดอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนในช่องการไหล ใช้การวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการ Transient Liquid Crystal (TLC) การศึกษาภายใต้เงื่อนไขเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ทตั้งแต่ 5 ถึง 8 mm ระยะห่างระหว่างเจ็ทตั้งแต่ 20 ถึง 40 mm ระยะพุงชนตั้งแต่ 5 ถึง 15 mm ที่เลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 6,500 ถึง 13,500 จากผลการทดลองพบว่าความต้องการลดอิทธิพลจากกระแสไหลตัดที่รบกวนการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลด้วยวิธีการเพิ่มทางออกของกระแสไหลตัดให้ไหลออกด้านข้างขนานไปตามแนวของเจ็ทพุงชนนั้นสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่วงหลังกระแสไหล (Downstream) จากเดิมที่บริเวณนี้จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ

Brakmann และคณะ [12] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนร่วมกับการติดครีบบางการไหลในช่องการไหล โดยศึกษาภายใต้เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 15,000 ถึง 3,5000 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ทเท่ากับ 10 mm ระยะพุงชนตั้งแต่ 3D ถึง 5D ความกว้างของครีบบางการไหลตั้งแต่ 0.3D ถึง 0.08D ความกว้างของช่องการไหลและระยะห่างระหว่างครีบบางการไหลเท่ากับ 5D ใช้การวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการ Transient Liquid Crystal (TLC) ร่วมกับการใช้โปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS ศึกษาพฤติกรรมของการไหลและการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหล



รูปที่ 2.7 โมเดลของช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษาของ Brakmann และคณะ [12]

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนร่วมกับการติดครีบขวางการไหลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในช่องการไหล รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการกระจายตัวของเลขตัวเลขนัสเซลล์ท์กรณีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนราบเรียบและกรณีติดครีบขวางการไหลที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 35,000 และ ระยะพุงชนเท่ากับ 6D การติดครีบขวางการไหลร่วมกับการใช้เจ็ทพุงชนเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลนั้นสามารถเพิ่มค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์ขึ้น 4% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดครีบขวางการไหล อีกทั้งครีบขวางการไหลยังสามารถลดอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่บริเวณเจ็ทพุงชนบริเวณหลังกระแสไหลได้ถึง 11%

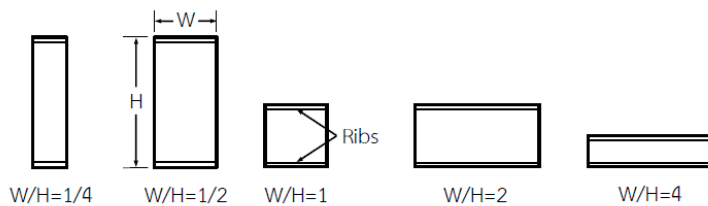


รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของเลขตัวเลขนัสเซลล์ท์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของ Brakmann และคณะ [12]

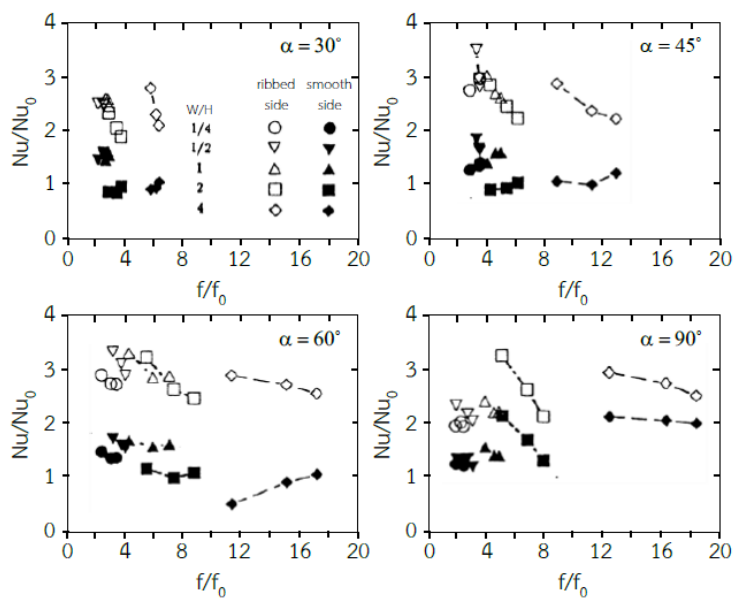
Park และคณะ [13] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล (W/H) ต่อสัมประสิทธิ์การกระจายการถ่ายเทความร้อนและความดันลด (Pressure drop) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในทดลองกำหนดอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหล $W/H=1/4, 1/2, 1, 2$ และ 4 มุมการติดตั้งครีบ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° ตามลำดับ ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=30,000$ จากผลการทดลองพบว่า การติดตั้งครีบที่มุม 60° ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่มีนัยสำคัญมาก แต่ความดันลดนั้นเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลเปลี่ยนจากน้อยไปมาก ($1/4$ ถึง 4) ซึ่งคล้ายกับผลของการติดตั้งครีบที่มุม 45° และ 90° โดยทั่วไปพบว่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลน้อย ให้ประสิทธิภาพการ

ถ่ายเทความร้อนดีกว่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลที่มาก ยกเว้นอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลน้อยของการติดตั้งครีบทามุม 30° ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและความดันลดเพิ่มขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับการติดตั้งครีบทามุมอื่นๆ นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลมาก ($W/H=4$) ของการติดตั้งครีบทามุม 30° มีผลของความเสียหายและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับการติดตั้งครีบทามุมอื่นๆ

รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์การกระจายการถ่ายเทความร้อนระหว่างอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล ($W/H=1/4$ ถึง 4) ต่อมุมของการติดตั้งครีบ พบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการติดตั้งครีบบนผนังเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า และความดันลดเพิ่มขึ้นประมาณ 4 ถึง 8 เท่าของการติดตั้งครีบทามุม 45° และ 60° เมื่อเทียบกับผนังที่ไม่มีการติดตั้งครีบ และยังพบว่าความดันลดเพิ่มขึ้นเพียง 2 ถึง 4 เท่าของการติดตั้งครีบทามุม 45° และ 60° ในระดับที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเท่ากันของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลแคบ ($W/H=1/4$) อย่างไรก็ตาม ในระดับที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเท่ากันของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลกว้าง ($W/H=4$) ความดันลดเพิ่มสูงขึ้น 8 ถึง 16 เท่าของความเสียหายในช่องการไหลที่มีการติดตั้งครีบ นอกจากนี้ ยังสรุปได้ว่า อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลแคบมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่าอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหลกว้าง

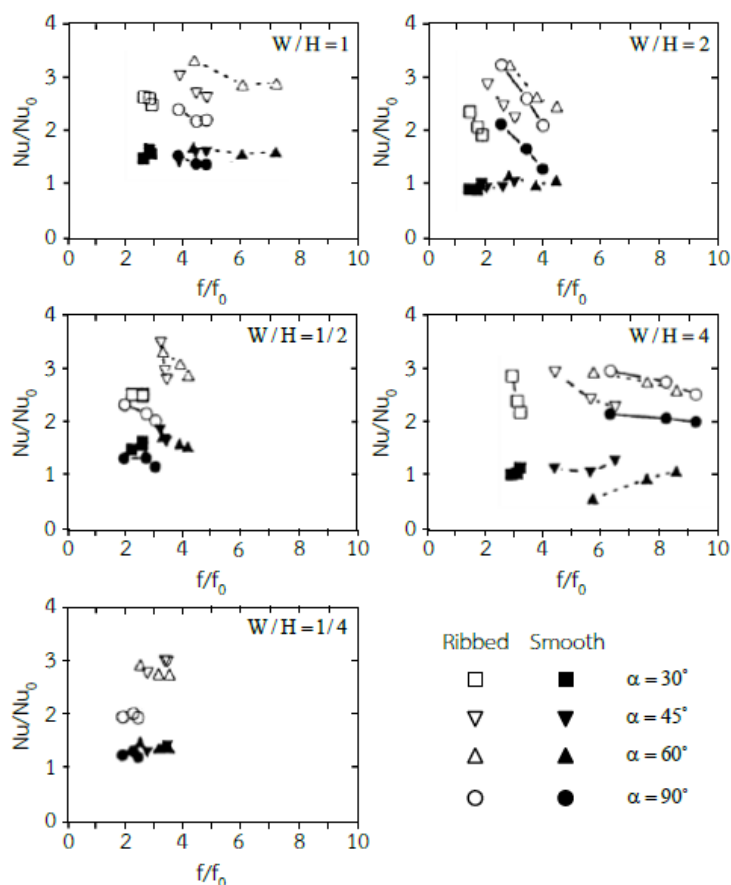


(ก) หน้าตัดของช่องการไหลแบบสี่เหลี่ยมที่อัตราส่วนความกว้างต่อความสูงต่างๆ



(ข) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการติดครีบบวมต่างๆ

รูปที่ 2.9 อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างต่อการถ่ายเทความร้อนของ Park และคณะ [13]

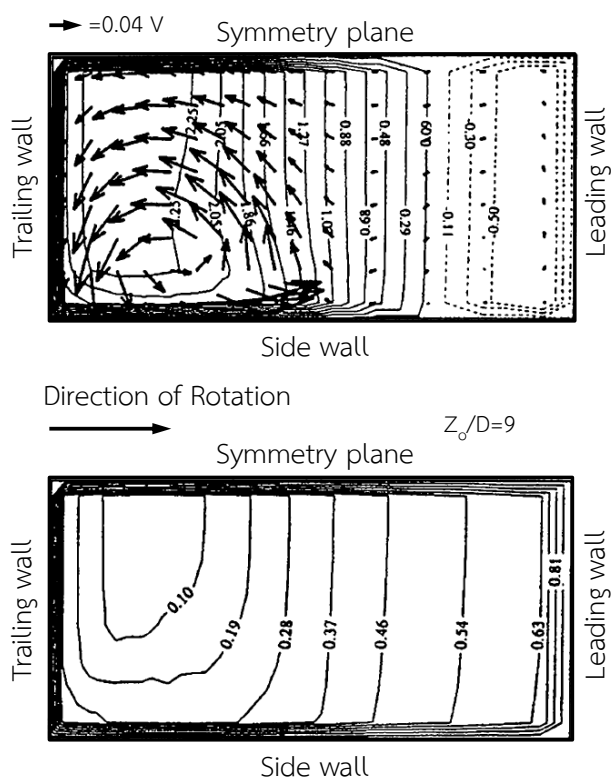


รูปที่ 2.10 ผลของมุมเอียงของครีบบนต่อการถ่ายเทความร้อนของ Park และคณะ [13]

2.7.2 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่หมุน

Dutta และคณะ [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายความเร็วและการกระจายอุณหภูมิในท่อสี่เหลี่ยมด้วยการไหลออกตามแนวรัศมีทั้งผลของแรงโคริโอลิสและแรงลอยตัวจากการหมุน พบว่าแรงโคริโอลิสและแรงลอยตัวจากการหมุนทำให้เกิดการกระจายความเร็วหมุนวนใกล้บริเวณส่วนท้ายมากกว่าบริเวณส่วนยอด ดังแสดงใน 2.10 ส่งผลให้การหล่อเย็นส่วนท้ายดีกว่าส่วนยอด

Liou และคณะ [15] ได้ทำการวัดของการพัฒนาการไหลภายในช่องการไหลแบบสองกลับด้วย Laser Doppler Velocimetry (LDV) ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ 14,000 และตัวเลขการหมุนที่ 0.082 ผลการทดลองพบว่า การหมุนช่วยลดการแยกตัวของฟองอากาศในบริเวณหลังส่วนกลับ (After-turn region) 25% ของโค้ง 180 องศา ในส่วนแรก (First pass) การหมุนทำให้โปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยตามแนวการไหลและการไหลตามแนวแกนบริเวณใกล้ผนังส่วนท้ายสูงกว่าผนังส่วนยอด สำหรับในส่วนที่สอง (Second pass) การไหลถูกรบกวนโดยส่วนกลับของโค้ง 180 องศาและจะเกิดจุดสูงสุด 2 จุดในการกระจายความเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่า ความรุนแรงความปั่นป่วนในแนวแกนการไหลลดลงและมากขึ้นบริเวณใกล้ผนัง ซึ่งความรุนแรงความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการหมุน

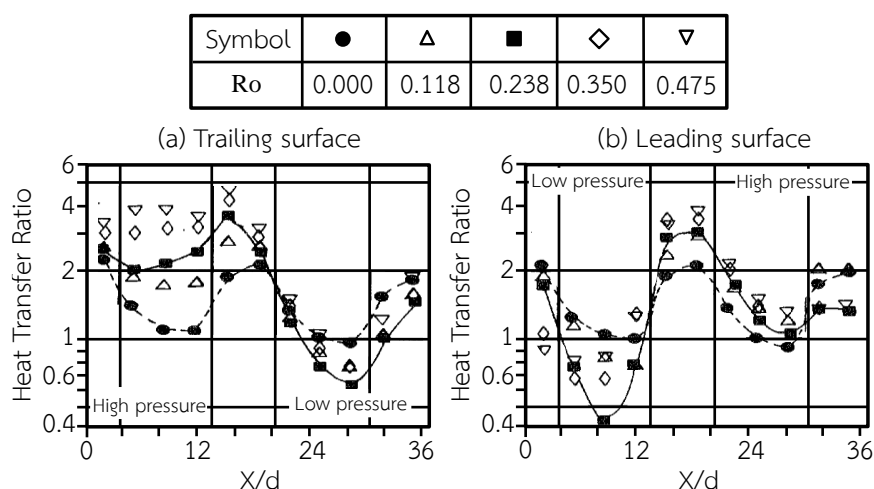


รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลอันดับสอง การไหลตามแนวแกน และการกระจายอุณหภูมิ
ในช่องการไหลที่หมุนของ Dutta และคณะ [14]

รูปที่ 2.11 แสดงผลกระทบของตัวเลขการหมุนต่ออัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนสำหรับ
 ผิวด้านท้ายและผิวยอด ในรูปนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราการหมุนก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน
 บนผิวด้านท้ายของหนึ่งกลีบ ($X/D < 12$) เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นลดลงเมื่อเทียบกับสองกลีบ
 ($X/D > 20$) ของผิวด้านยอด อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทความร้อนในหนึ่งกลีบเพิ่มขึ้นที่ค่าอัตราการ
 ถ่ายเทความร้อนมากกว่า 3.5 ซึ่งค่าตัวเลขการหมุนถูกเปรียบเทียบกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน
 กรณีท่อหยุดนิ่ง ในขณะที่ผิวด้านยอดสองกลีบ พบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5 เท่า
 เมื่อเทียบกับกรณีท่อหยุดนิ่ง นอกจากนี้ การกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างขา
 ออก (หนึ่งกลีบ) และขาเข้า (สองกลีบ) มีผลของแรงลอยตัวจากการหมุนต่างกันของการไหลออกและ
 เข้าตามแนวรัศมีการหมุน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวหนึ่งกลีบด้านท้าย
 เพิ่มขึ้นมี 2 เหตุผลคือ เหตุผลแรกคือ การหล่อเย็นไหลปะทะบนผิวด้านท้ายโดยการไหลอันดับสอง
 เนื่องจากแรงโคริโอลิส (สร้างชั้นขอบเขตที่บาง) และเหตุผลที่สองคือ โปรไฟล์อุณหภูมิหล่อเย็นให้ผล
 ที่ดีเนื่องจากแรงลอยตัวจากการหมุนของการไหลใกล้ชั้นขอบเขตที่บางของพื้นผิวด้านท้ายที่ไม่เสถียร
 สำหรับการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้ทางเข้าของช่องการไหลบนพื้นผิวหนึ่ง
 กลีบด้านยอดเนื่องจากชั้นขอบเขตที่หนา นอกจากนี้ ยังมีผลของส่วนกลีบสามารถเพิ่มการถ่ายเท

ความร้อนในส่วนถัดมาของหนึ่งกลีบ การไหลหล่อเย็นตามแนวรัศมีขาเข้าในสองกลีบ (ตรงข้ามกับหนึ่งกลีบ) แรงโคริโอลิสยังกระทำในตำแหน่งตรงกันข้ามซึ่งจะเกิดการไหลขนาดใหญ่เคลื่อนตัวไปยังพื้นผิวด้านยอด และยังพบว่าของเหลวเย็นถูกเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็วใกล้กับผนังด้านยอดและของเหลวอุ่นถูกเคลื่อนตัวอย่างช้าใกล้ผนังด้านท้าย ด้วยเหตุนี้ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนผิวด้านยอดสูงกว่าผิวด้านท้าย

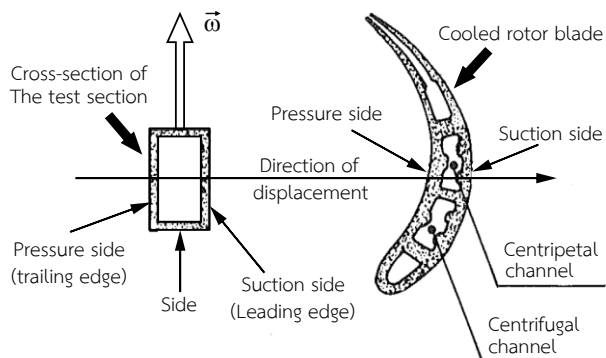
Johnston และคณะ [16] ได้ศึกษาผลการหมุนต่อการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงผลกระทบของการหมุนในการถ่ายเทความร้อนจากหนึ่งกลีบด้านยอดและสองกลีบด้านท้าย พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวลดลงเมื่อตัวเลขการหมุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลในแนวแกนลดลงและผนังที่เสถียรบริเวณการไหลใกล้พื้นผิวด้านยอด การไหลอันดับสองจากการหมุนพาของเหลวตามผนังที่ร้อนอื่นๆ ก่อนที่จะถึงผนังด้านยอด นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงจากผนังด้านยอด



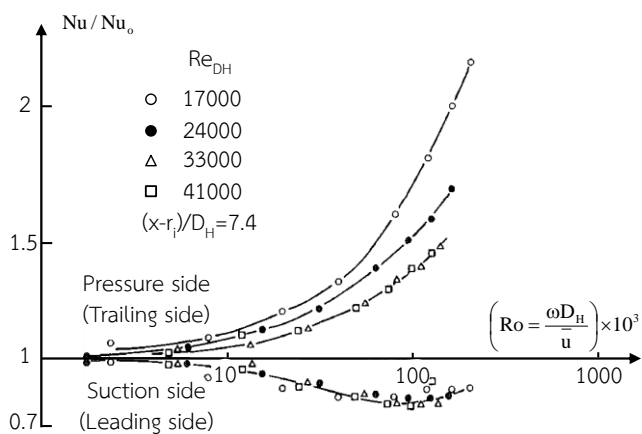
รูปที่ 2.12 ของตัวเลขการหมุนต่ออัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ ($Re=25,000$ และ อัตราส่วนความหนาแน่นเท่ากับ 0.13) ของ Johnston และคณะ [16]

Guidex [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีการหมุน รูปที่ 2.13 แสดงรูปร่างของช่องการไหลและทิศทางของการหมุน จากการทดลองพบว่า การหมุนสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลหมุนวนอันดับสองขึ้นภายในหน้าตัดของช่องการไหล การไหลอันดับสองแบบพัฒนาตัวเกิดการเอียงตัวและการกระจายการไหลบริเวณส่วนกลับของโค้ง 180 องศา ซึ่งส่งผลสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว รูปที่ 2.3 แสดงอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ในด้านความดัน (ด้านท้าย) และด้านดูด (ด้านยอด) ที่ตัวเลขการหมุนต่างกัน พบว่าพื้นผิวด้านยอดไม่ขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ส่วนพื้นผิวด้านท้ายค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีผลกระทบอย่างมาก ในขณะที่ค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.1$ ที่ผิวด้านท้าย พบว่า อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์

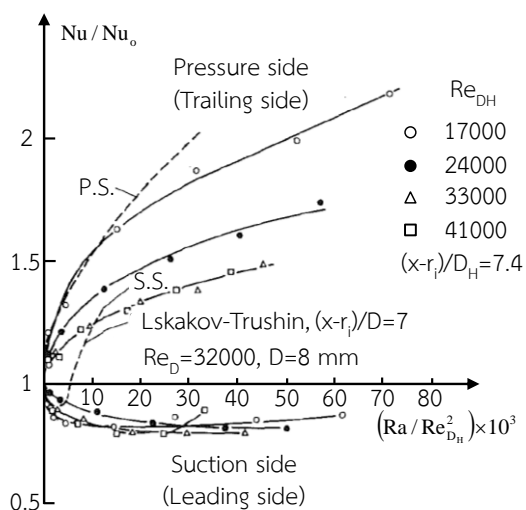
เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มตัวเลขการหมุน รูปที่ 2.4 แสดงผลกระทบของแรงลอยตัวที่หมุนต่อการถ่ายเทความร้อน พบว่า ผิวด้านท้ายมีอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ส่วนใหญ่สูงขึ้นด้วยการใช้ช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม



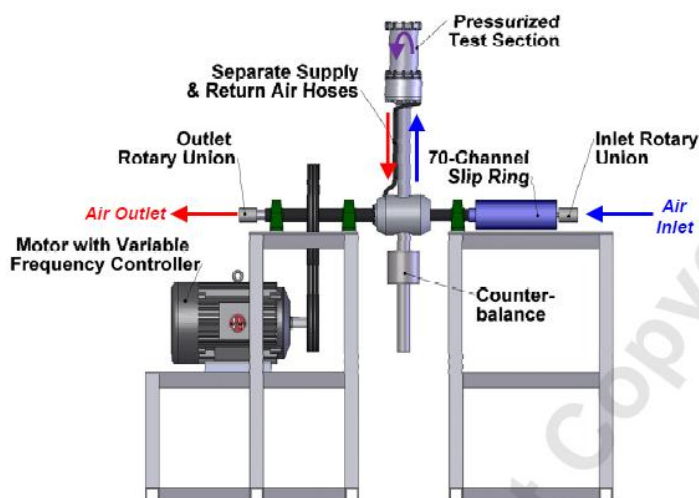
รูปที่ 2.13 ช่องการไหลหล่อเย็นภายในใบพัดแบบสี่เหลี่ยมของ Guidez [17]



รูปที่ 2.14 ค่าอัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ต่อตัวเลขการหมุนของ Guidez [17]

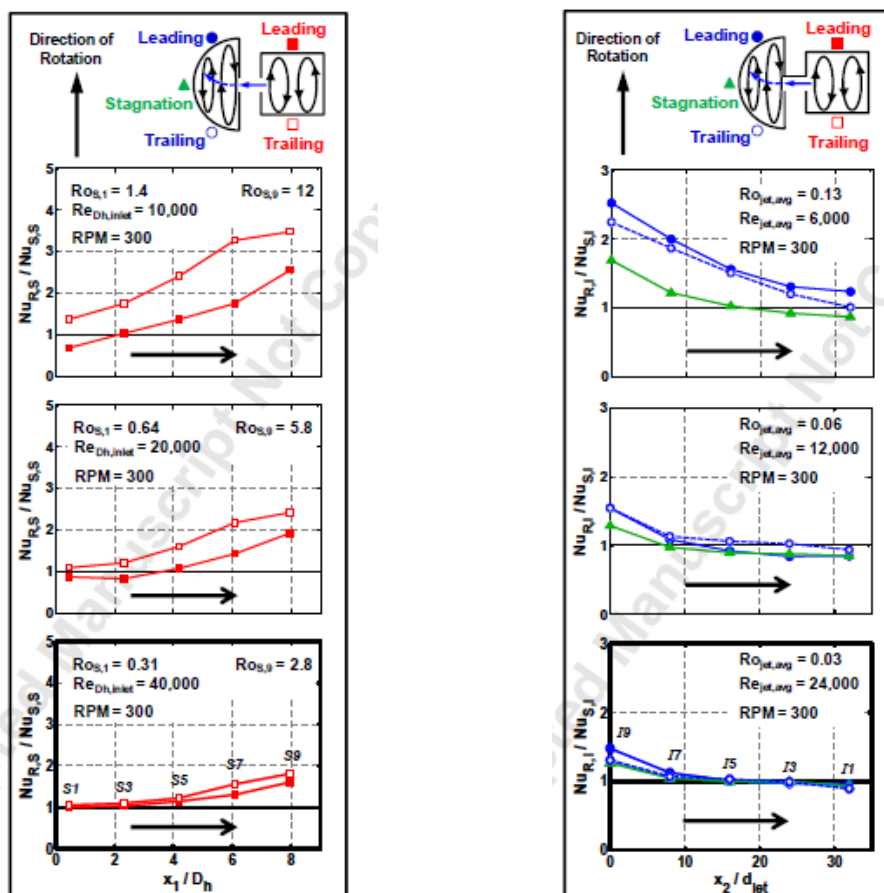


รูปที่ 2.15 อัตราส่วนนัสเซลต์นัมเบอร์ต่อตัวเลขเรย์ลีที่หมุนของ Guidez [17]



รูปที่ 2.18 แผนภาพชุดทดลอง [18]

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในส่วนของ Supply channel ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามความเร็วการหมุน โดยในตำแหน่งที่มีรัศมีการหมุนมากจะให้การถ่ายเทความร้อนที่มากตามไปด้วยและผนังด้าน Trailing ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าผนังด้าน Leading ทุกกรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ก) การถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่มีค่า $Re_{jet,avg} = 6,000$ $Ro_{jet,avg} = 0.13$ และรอบการหมุนที่ 300 rpm ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นได้ง่ายที่สุดและให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนเมื่อเข้าใกล้บริเวณทางออกของช่องการไหล กรณีที่มีค่า $Re_{jet,avg} = 24,000$ $Ro_{jet,avg} = 0.03$ และรอบการหมุนที่ 300 rpm ตำแหน่งเจ็ทที่ห่างจากทางออกมากที่สุด (ตำแหน่ง I9) จะได้รับผลกระทบมากที่สุดเนื่องจาก Coriolis force และตำแหน่งเจ็ทที่ใกล้ทางออกมากที่สุด (ตำแหน่ง I1) จะได้รับผลกระทบจากกระแสไหลตัดมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ข)

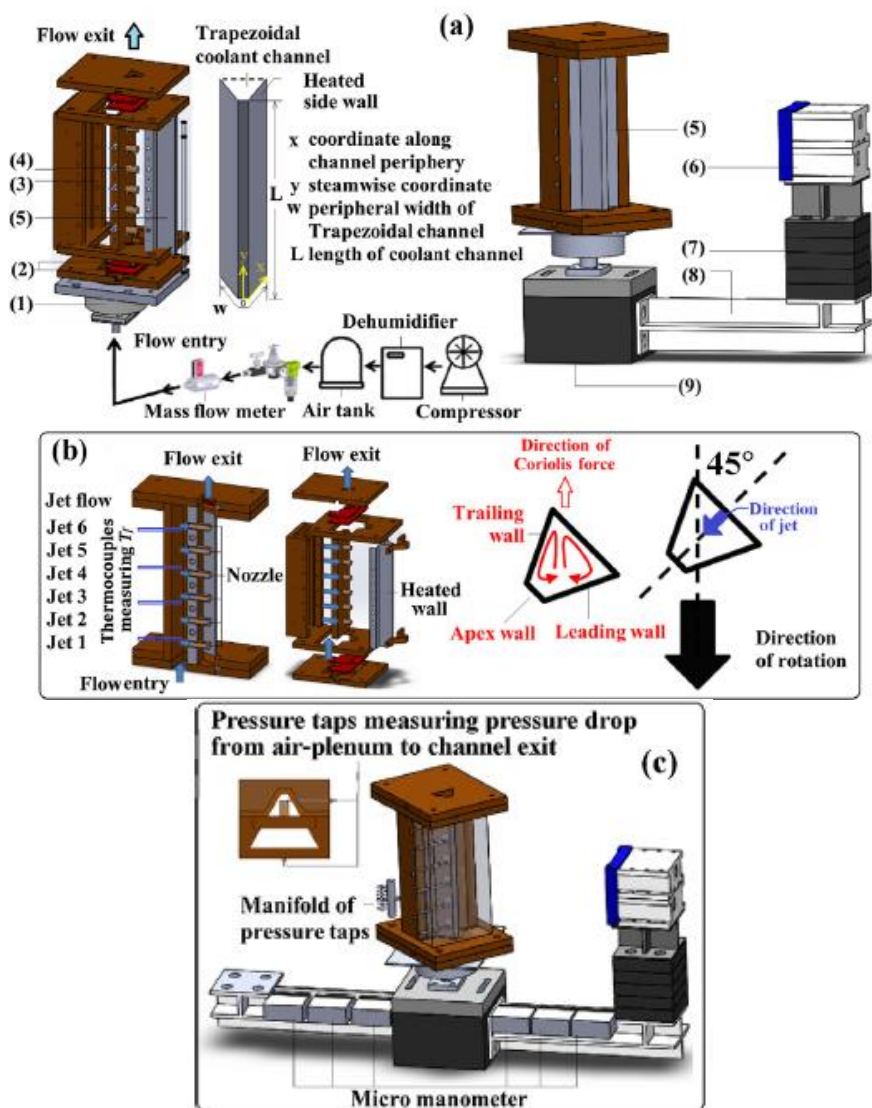


(ก) พื้นผิวใน Supply channel

(ข) พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

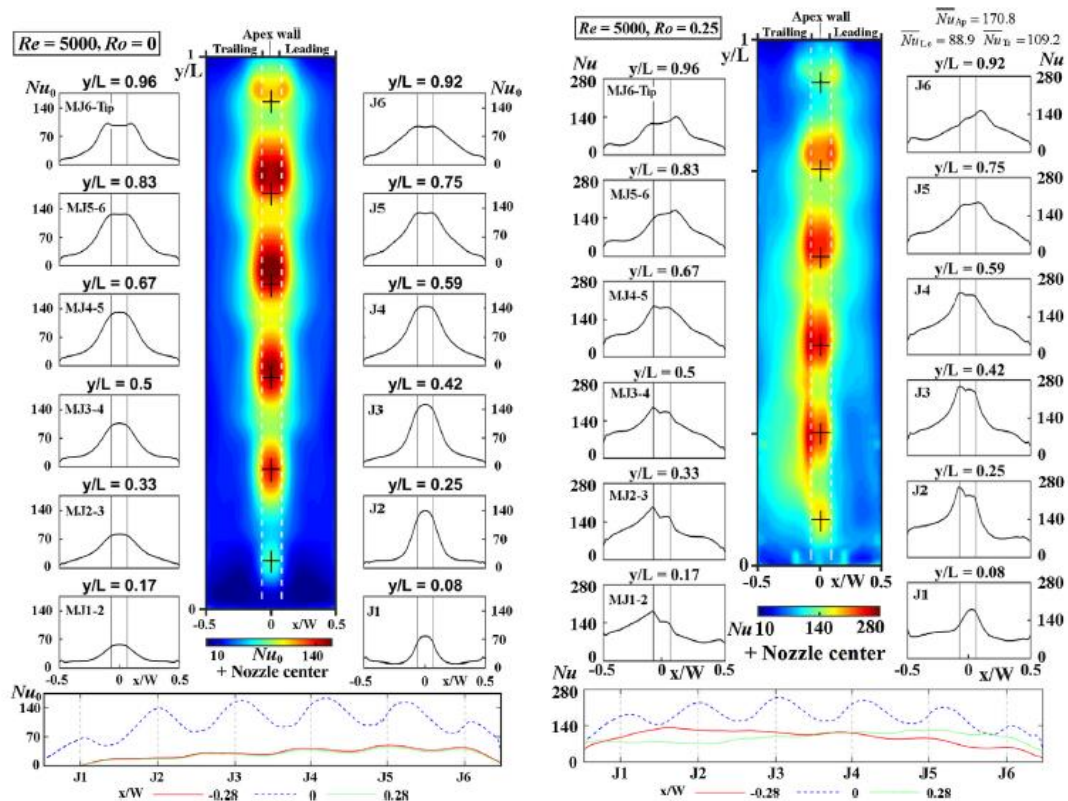
รูปที่ 2.19 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่หมุนด้วยความเร็วรอบ 300 rpm ของ Elston และ Wright [18]

Chang และ Yu [19] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแนวเดียวในช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูที่หมุน ลักษณะเจ็ทเป็นแถวเดี่ยวจำนวนรูเจ็ท 6 รู เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (d_j) เท่ากับ 15 mm โดยมีเงื่อนไขที่เลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 17,500 ตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.3 โดยใช้วิธีการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยการถ่ายภาพจากกล้องอินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 2.19 หน้าตัดของช่องการไหลที่เจ็ทพุ่งชนปะทะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อจำลองให้ใกล้เคียงบริเวณส่วนหัวใบพัดจริงและลำเจ็ทเอียงทำมุม 45 องศา กับทิศทางการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



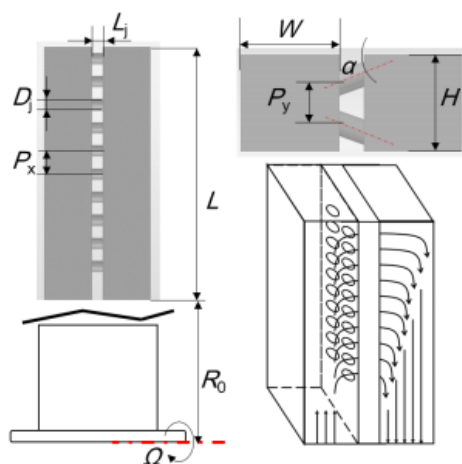
รูปที่ 2.20 แผนภาพชุดทดลองทั้งระบบของ Chang และ Yu [19]

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนความร้อนของเจ็ทพุ่งชนที่ปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูในลักษณะที่ลำเจ็ททำมุม 45 องศา กับทิศทางการหมุน เปรียบเทียบกรณีหยุดนิ่งและในกรณีที่หมุนพบว่าผลของ Coriolis force ทำให้การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ท์ไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ในกรณีที่ ตัวเลขการหมุนเท่ากับ 0.05 ผนังที่เจ็ทพุ่งชนฝั่ง Leading ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลง และผนังฝั่ง Trailing ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเล็กน้อย

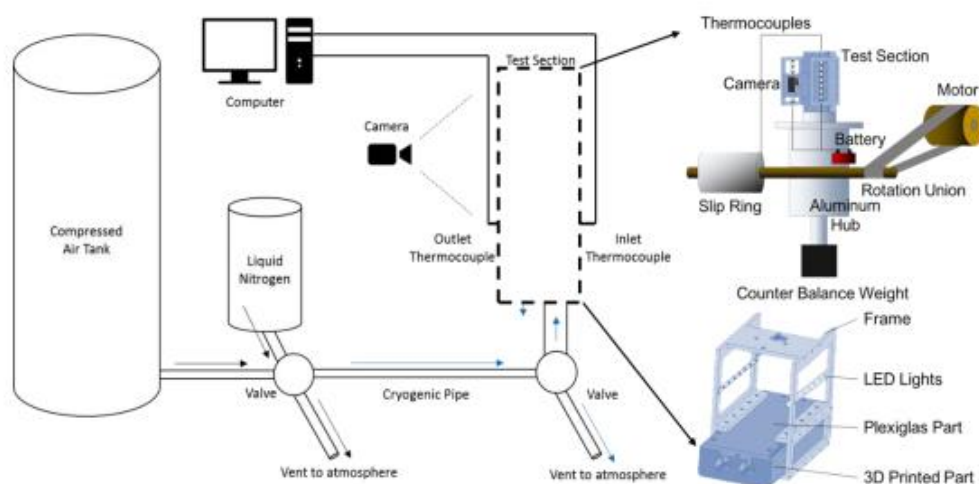


รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบการกระจายตัวของเลขนัสเซลท์ที่ เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 5,000 กรณีหยุดนิ่งและเลขการหมุนเท่ากับ 0.25 ของ Chang และ Yu [19]

Yang และคณะ [20] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบ Two-Pass ด้วยเจ็ทพุ่งชนภายใต้เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 25,000 ถึง 100,000 เลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.14 ใช้การวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการ Transient Liquid Crystal (TLC) โดยใช้เจ็ทพุ่งชนสองแถว แต่ละแถวมีลำเจ็ท 10 ลำ เส้นผ่านศูนย์กลางลำเจ็ทเท่ากับ 6.35 mm และลำเจ็ทเอียงทำมุม 20 องศา เพื่อปะทะพื้นผิวและเปลี่ยนความร้อนเป็นผนังฝั่ง Leading และ Trailing ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในการทดลองใช้ Liquid Nitrogen ผสมกับอากาศเป็นของไหล และบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้วยกล้องดิจิตอล ดังแสดงในรูปที่ 2.21

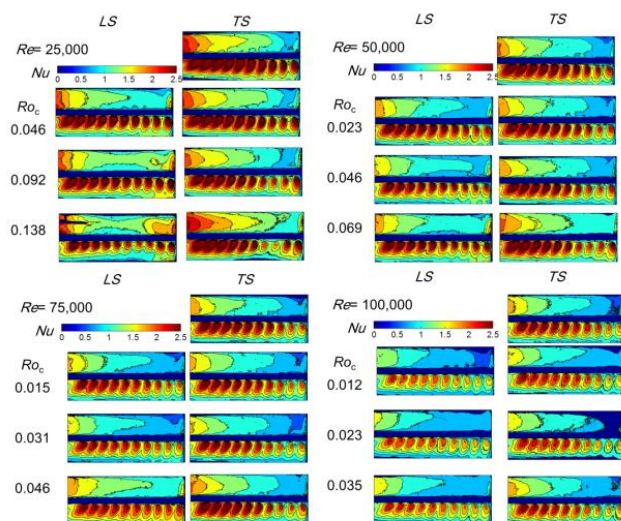


รูปที่ 2.22 รายละเอียดของส่วนทดสอบและทิศทางการไหลของของไหลของ Yang และคณะ [20]

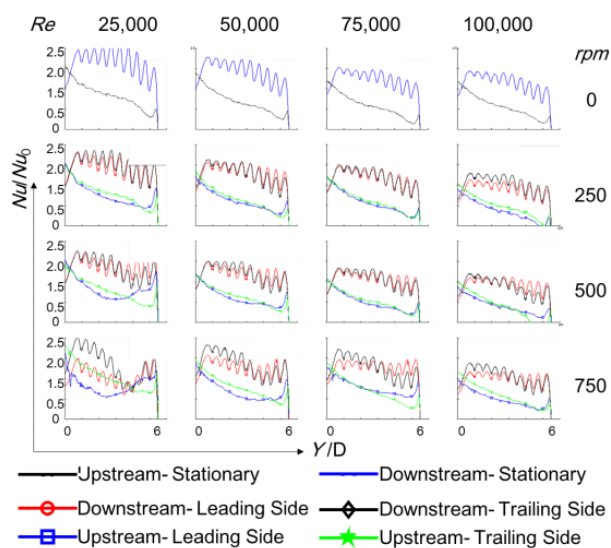


รูปที่ 2.23 แผนภาพชุดทดลอง [20]

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนพบว่าในกรณีที่เกิดการหมุนทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงในช่องการไหล Second-Pass ทั้งผนังฝั่ง Leading และ Trailing 25% เป็นผลมาจาก Coriolis force แต่การหมุนเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหล First-Pass ในช่วงปลายของช่องการไหลเป็นผลมาจาก Centrifugal force และ pumping effect การหมุนส่งผลให้เกิดการได้เปรียบในฝั่ง Trailing ของช่องการไหล First-Pass และประสิทธิภาพลดลงฝั่ง Leading ในช่องการไหล Second-Pass

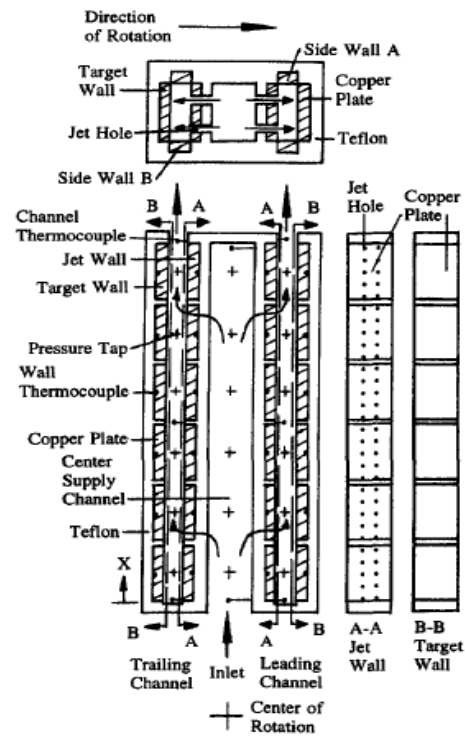


รูปที่ 2.24 ผลของการกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ท์ที่เลขเรย์โนลด์ 25,000, 50,000, 75,000, 100,000 ของ Yang และคณะ[20]

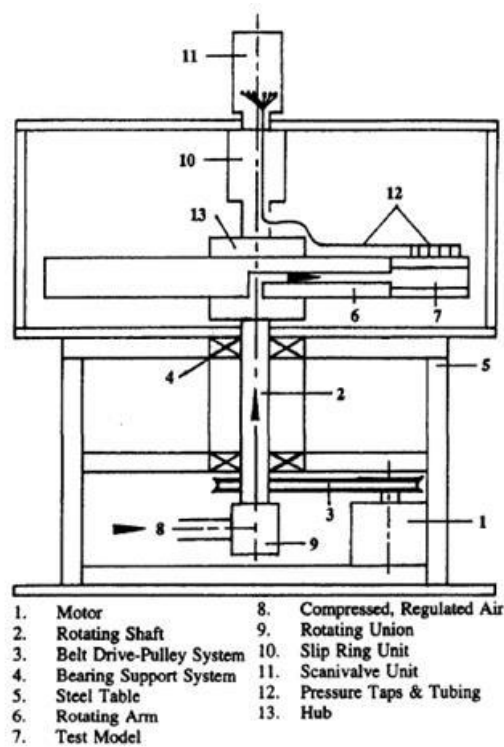


รูปที่ 2.25 ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนตัวเลขนัสเซลล์ท์ตามกับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างรูเจ็ท (Y/D) ของ Yang และคณะ [20]

Parson และคณะ [21] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน โดยจำลองช่องการไหลที่เจ็ทพุ่งชนให้ใกล้เคียงกับบริเวณส่วนกลางของใบพัด โดยเจ็ทสองแถวเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (d_j) เท่ากับ 1.59 mm ระยะพุ่งชน (H) เท่ากับ $6d_j$ ภายใต้เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ (Re_{jet}) ที่ 5,000 และ 10,000 เลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0028 โดยใช้การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยการฝังเทอร์โมคัปเปิล ชนิด T ได้แผ่นทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.25

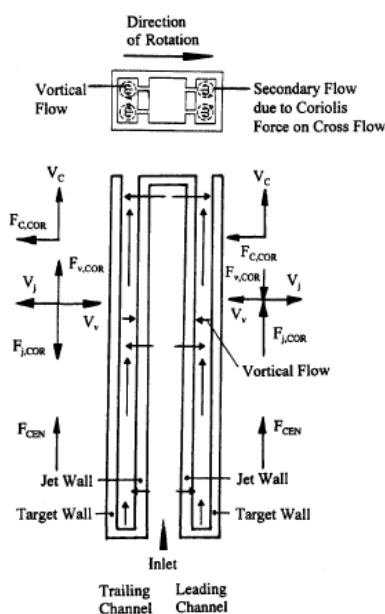


รูปที่ 2.26 ส่วนทดสอบและรายละเอียดของ Parson และคณะ [21]

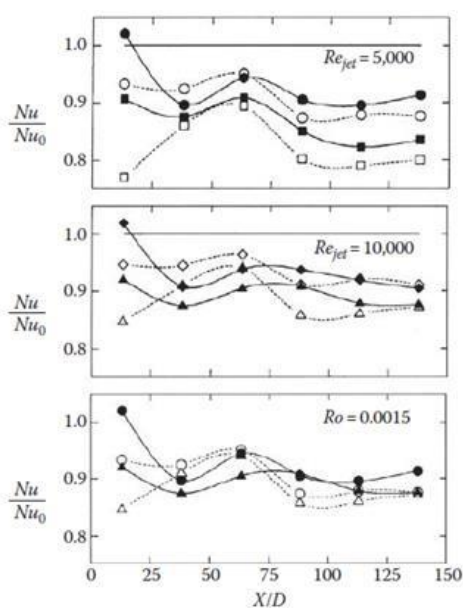


รูปที่ 2.27 แผนภาพชุดทดลองของ Parson และคณะ [21]

รูปที่ 2.27 แสดงรายละเอียดของส่วนทดสอบ ทิศทางการหมุน Leading channel คือช่อง การไหลที่ทิศทางของลำเจ็ทมีทิศทางเดียวกับทิศทางการหมุน Trailing channel คือช่องการไหลที่ ทิศทางของลำเจ็ทตรงข้ามกับทิศทางของการหมุน แสดงทิศทางของความเร็ว Coriolis forces และ Centrifugal forces ที่เกิดขึ้นในส่วนทดสอบ รูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นว่ากรณีที่เกิดการหมุนทำให้อัตราส่วนของตัวเลขนัสเซลต์ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง โดยที่ Leading channel ลดลง 15% และ Trailing channel ลดลง 20%



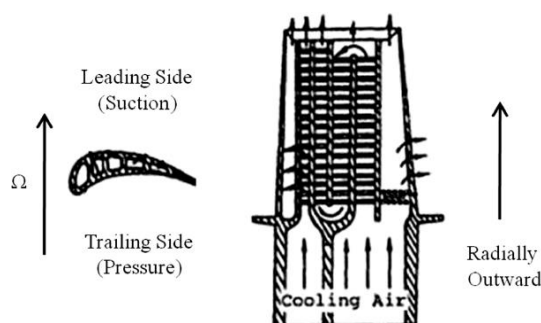
รูปที่ 2.28 ทิศทางของความเร็วและแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นของ Parson และคณะ [21]



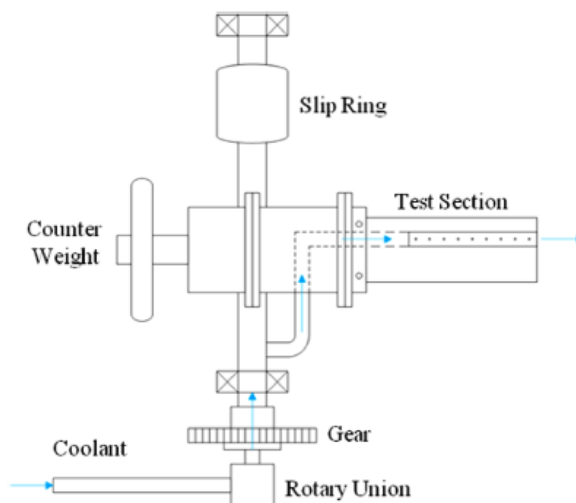
Re_{jet}		10,000	10,000	5,000	5,000
rpm	0	400	800	400	800
Ro	0	0.0008	0.0015	0.0015	0.0028
Leading	—	◆	▲	●	■
Trailing	—	◇	△	○	□

รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบอัตราส่วนของตัวเลขนัสเซลต์ต่อระยะของ Parson และคณะ [21]

Lamont และคณะ [22] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน โดยจำลองช่องการไหลที่เจ็ทพุ่งชนให้ใกล้เคียงกับบริเวณส่วนกลางของใบพัดต่อ โดยใช้เจ็ทแถวเดียว จำนวนรูเจ็ทเท่ากับ 9 รู เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (d_j) เท่ากับ 3.175 mm ระยะห่างระหว่างรูเจ็ท (s) เท่ากับ $8d_j$ ภายใต้เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ (Re_{jet}) ตั้งแต่ 0 ถึง 9,000 เลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0022 ระยะพุ่งชน (H/d_j) เท่ากับ 1, 2 และ 3 ใช้การวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการ Transient Liquid Crystal (TLC) โดยใช้กล้องดิจิทัลฉบับที่ภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

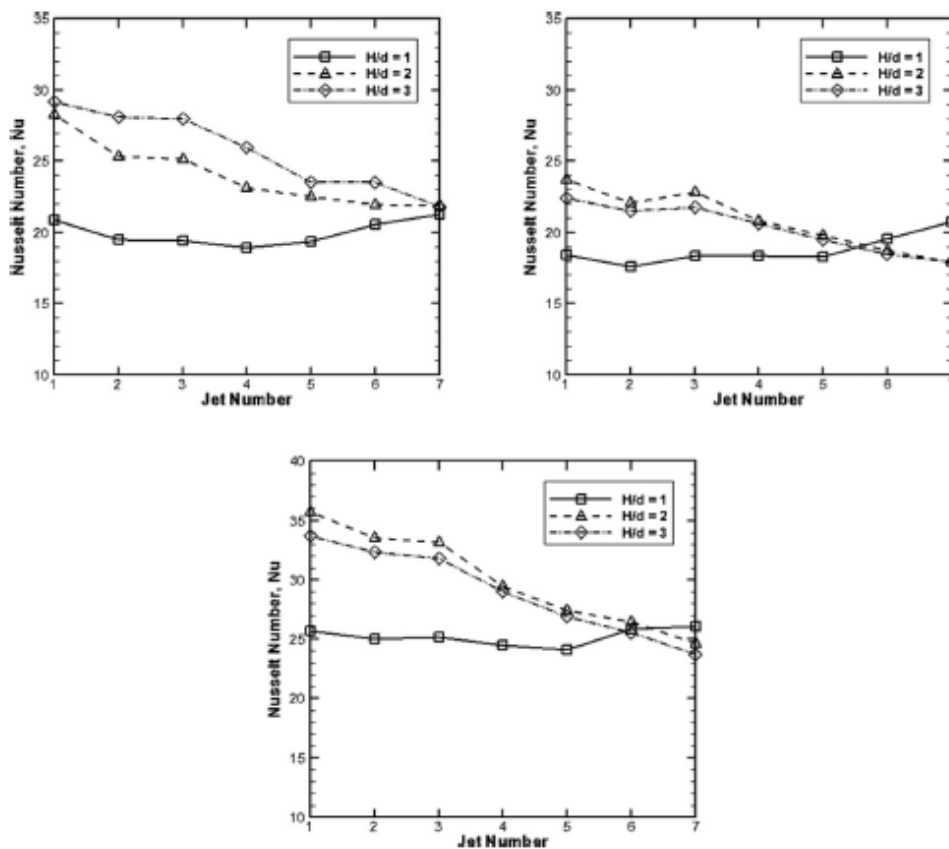


รูปที่ 2.30 การระบายความร้อนมาตรฐานที่ใช้ในใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ (ขวา) ภาพตัดส่วนของใบพัดแสดงให้เห็นช่องการไหล (ซ้าย) ของ Lamont และคณะ [22]

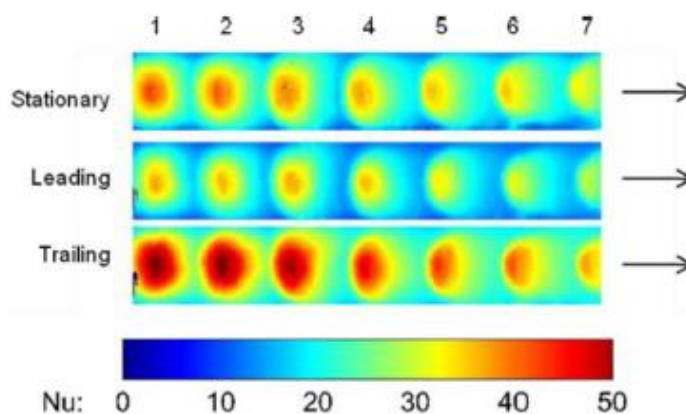


รูปที่ 2.31 แสดงแผนภาพชุดทดลอง [22]

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชนในกรณีหยุดนิ่งพบว่า ระยะพุ่งชน (H/d_j) เท่ากับ 3 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด แต่ในกรณีที่หมุน ระยะพุ่งชน (H/d_j) เท่ากับ 2 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าทั้งด้าน Leading channel และ Trailing channel ในตำแหน่งเจ็ทที่ใกล้บริเวณทางออกมากที่สุดให้การถ่ายเทความร้อนลดลง เนื่องจากผลของกระแสไหลตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.32 (บนซ้าย) อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับตำแหน่งเจ็ทกรณีหยุดนิ่ง (บนขวา) อัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับตำแหน่งเจ็ทกรณี Leading channel (ล่าง) แสดงอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กับตำแหน่งเจ็ทกรณี Trailing channel ของ Lamont และคณะ [22]



รูปที่ 2.33 การกระจายของตัวเลขนัสเซิลท์กรณี (H/d) เท่ากับ 2 ของ Park และคณะ [13]

2.7.3 สรุปการทบทวนเอกสาร

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เจ็ทพุงชนในการถ่ายเทความร้อนเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นการลดผลกระทบของกระแสไหลตัดที่รบกวนการไหลของเจ็ทพุงชนทำให้การถ่ายถ่ายความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุงชนในช่องการไหลต่ำด้วยวิธีต่างๆ จากการทบทวนเอกสารพบว่าหากเป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยใช้เจ็ทพุงชนในสภาวะหมุนนั้น จะมุ่งเน้นการนำเจ็ทพุงชนระบายความร้อนไปที่ตำแหน่งส่วนหัวของใบพัด (Leading edge) ซึ่งการใช้เจ็ทพุงชนในลักษณะนี้ทิศทางของลำเจ็ทจะตั้งฉากหรือทำมุมกับทิศทางการหมุนของใบพัด มีงานวิจัยน้อยมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำเจ็ทพุงชนมาระบายความร้อนในส่วนตรงกลางใบพัด ทิศทางของลำเจ็ทจะขนานกับการหมุนของใบพัด อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาการนำเจ็ทพุงชนไปใช้ในลักษณะนี้มีการกำหนดทางออกของช่องการไหลหลังจากเจ็ทพุงชนปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงแค่รูปแบบเดียวคือ ปล่อยออกด้านนอกตามแนวรัศมีของแขนการหมุนเท่านั้น

2.7.4 ช่องว่างงานวิจัย

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการใช้เจ็ทพุงชนระบายความร้อนในบริเวณกลางใบพัดน้อยมาก อีกทั้งมีการกำหนดทางออกของช่องการไหลหลังจากเจ็ทพุงชนปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงแค่รูปแบบเดียว การใช้สายเทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิยังเป็นการวัดที่ไม่ละเอียดเท่าที่ควร อีกทั้งไม่มีการเปรียบเทียบรูปแบบทางออกที่ต่างกันของช่องการไหลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลที่หมุน

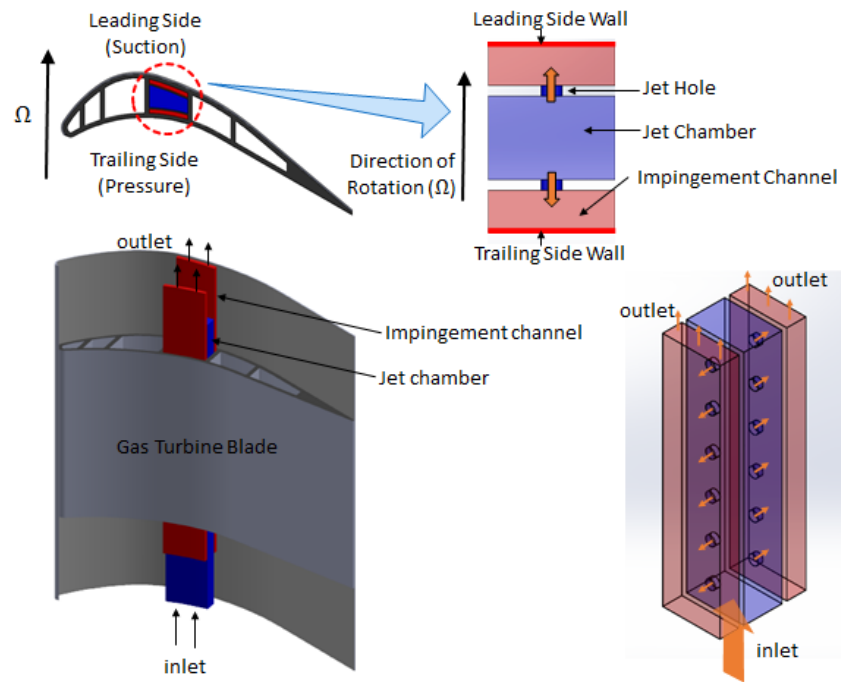
บทที่ 3

ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงชุดทดลองและขั้นตอนในการวิจัยซึ่งเป็นการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เจ็ทพุ่งชนปะทะ เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนและกรณีที่ช่องการไหลหยุดนิ่ง สำหรับการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวทำการวัดโดยใช้แผ่น ThermoChromic Liquid Crystal (TLC) และส่วนของการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน เป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) เพื่อเปรียบเทียบและอธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับการทดลอง

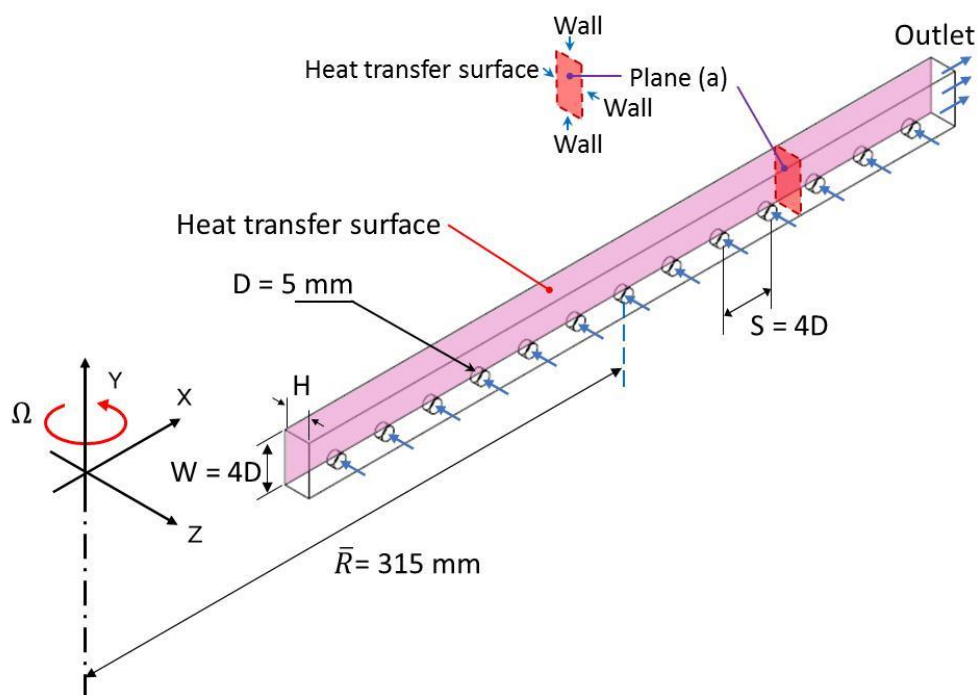
3.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนโดยจำลองการระบายความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนในบริเวณส่วนกลางใบพัดนั้น รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างการไหลและทิศทางของเจ็ทในใบพัดกังหัน ซึ่งภายในใบพัดจะมีช่องการไหลเพื่อระบายความร้อนภายในให้กับผิวทั้ง 2 ฝั่งของใบพัดนั้นก็คือ ด้าน Suction และ ด้าน Pressure ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนนี้ผนังด้านที่ทิศทางของเจ็ทพุ่งชนเข้าปะทะมีทิศทางเดียวกับทิศทางทางการหมุนถูกเรียกว่า Leading Side Wall และ ผนังด้านที่ทิศทางของเจ็ทพุ่งชนเข้าปะทะพื้นผิวมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางทางการหมุนถูกเรียกว่า Trailing Side Wall



รูปที่ 3.1 โครงสร้างการไหลและทิศทางการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหัน

รูปที่ 3.2 แสดงโมเดลของช่องการไหล โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ทเท่ากับ 5 mm จำนวน 13 รู มีรัศมีของแขนการหมุนเฉลี่ยเท่ากับ 315 mm ซึ่งวัดจากแกนหมุนถึงจุดศูนย์กลางรูเจ็ท ตำแหน่งที่ 7 ระยะห่างระหว่างรูเจ็ทและความกว้างของช่องการไหลเท่ากับ 4D ระยะพุ่งชนที่ 2D, 4D และ 6D โมเดลช่องการไหลนี้แสดงให้เห็นการไหลหลังจากอากาศผ่านแผ่นออริฟิสที่เจาะรูจำนวน 13 รู เป็นลำเจ็ทพุ่งชนกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วถูกบังคับให้ออกตรงตำแหน่งทางออกที่กำหนด

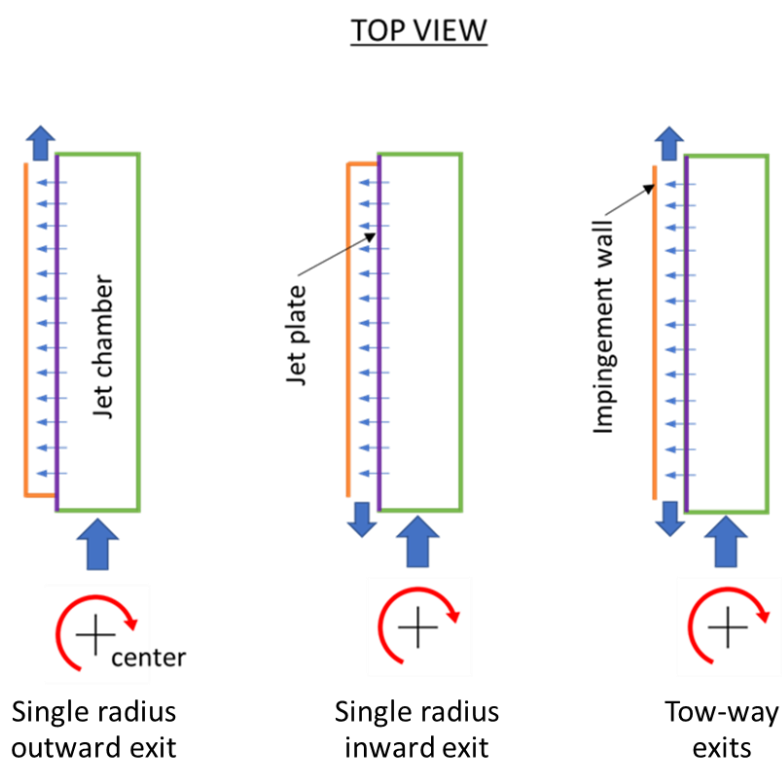


รูปที่ 3.2 โมเดลของช่องการไหล

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนทำการศึกษากายใต้เงื่อนไขค่าตัวเลขเรย์โนลด์ $Re=6,000, 7,500$ และ $9,000$ ระยะพุ่งชน $H=2D, 4D$ และ $6D$ มีความกว้างของช่องการไหลและระยะห่างระหว่างรูเจ็ทคงที่เท่ากับ $4D$ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท $D=5$ mm ตัวเลขการหมุน R_o ตั้งแต่ 0 ถึง 0.0069 โดยคำนวณมาจากความเร็วรอบการหมุน $N=0, 50, 100, 150, 200$ และ 250 rpm ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบทางออกของช่องการไหลถูกกำหนดไว้ 3 รูปแบบ 3 รูปแบบ โดยแบบที่ 1 มีทางออกของช่องการไหล 1 ทาง มีทิศทางพุ่งออกจากจุดหมุน แบบที่ 2 มีทางออกของช่องการไหล 1 ทาง มีทิศทางพุ่งเข้าหาจุดหมุน และรูปแบบที่ 3 มีทางออกของช่องการไหล 2 ทาง มีทิศทางเข้าพุ่งเข้าและออกจากจุดหมุนแสดงโมเดลใน รูปที่ 3.3 สำหรับเงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1 และแรงที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตามค่าตัวเลขการหมุนแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	กำหนดค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (D)	5 mm
ความหนาของแผ่นออริฟิส (t)	3 mm
ระยะห่างระหว่างเจ็ท (S)	4D
ความกว้างของช่องการไหล (W)	4D
ระยะพุ่งชน (H)	2D, 4D และ 6D
ตัวเลขการหมุน (R_o)	0 ถึง 0.0069
ความเร็วรอบการหมุน (N)	0, 50, 100, 150, 200 และ 250 rpm
ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)	6,000, 7,500 และ 9,000
รูปแบบทางออก	Single radius outward exit, Single radius inward exit และ Two-way exits



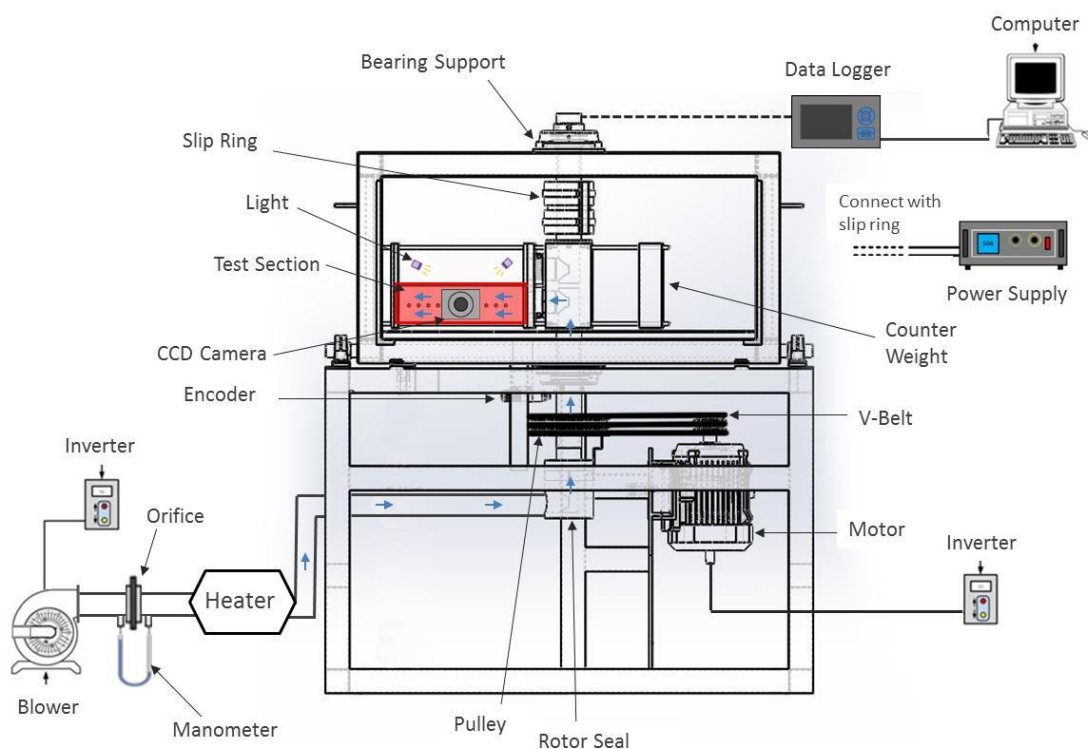
รูปที่ 3.3 รูปแบบทางออกของช่องการไหล

ตารางที่ 3.2 แรงที่เกิดขึ้นในช่องการไหลตามค่าตัวเลขการหมุนที่ใช้ในการศึกษา

Rotation number (R_o)	$F_{cor} (\times 10^{-5})$ [N]	$F_{cen} (\times 10^{-8})$ [N]
0.0009	2.19	2.84
0.0018	4.38	10.15
0.0028	6.56	22.84
0.0037	8.75	40.61
0.0046	10.94	63.44

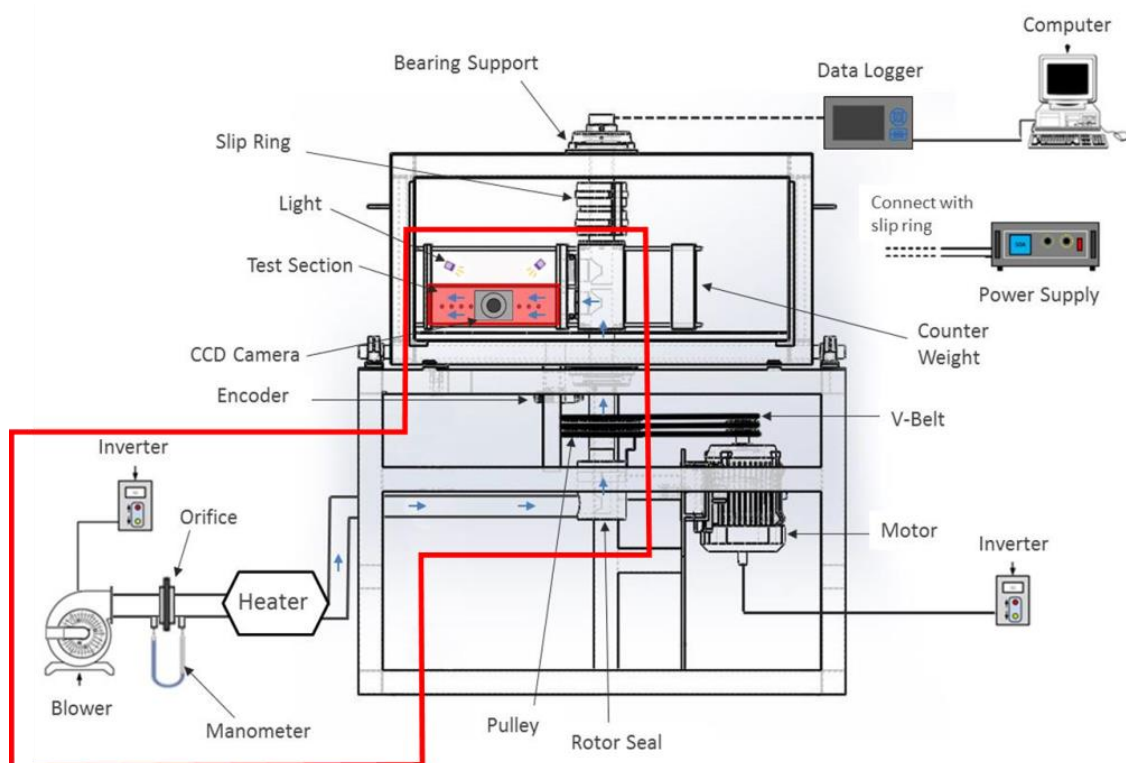
3.2 ชุดทดลอง

รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดชุดทดลองสำหรับการศึกษการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน รายละเอียดของชุดทดลองสำหรับการศึกษการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการหล่อเย็น ส่วนของการหมุน และส่วนการสร้างฟลักซ์ความร้อน สำหรับรายละเอียดของหลักการทำงานในแต่ละส่วนจะอธิบายในลำดับถัดไป



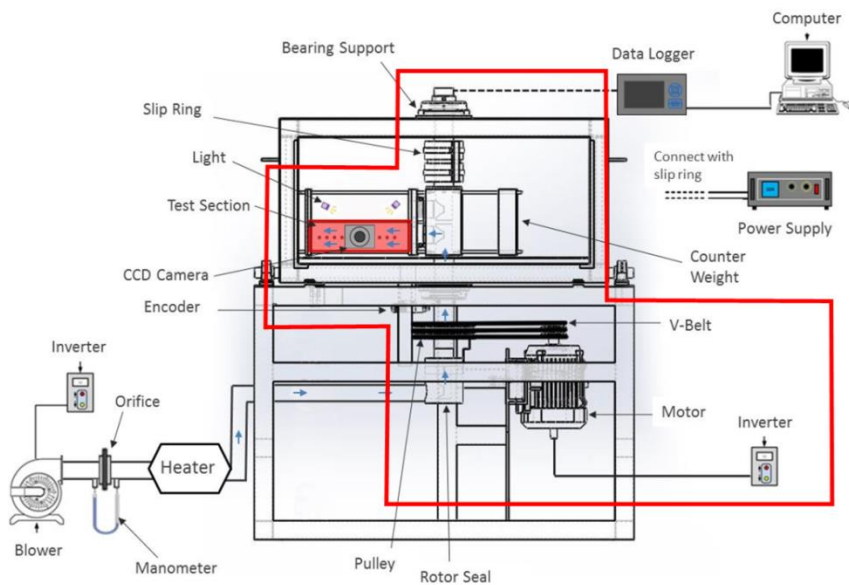
รูปที่ 3.4 รายละเอียดชุดทดลองสำหรับการศึกษการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชน
ในช่องการไหลที่หมุน

รูปที่ 3.5 แสดงรายละเอียดชุดทดลองในส่วนการหล่อเย็น โดยในส่วนของการหล่อเย็น เริ่มต้นจากอากาศในห้องทดลองถูกดูดผ่านโบลเวอร์ขนาด 3 HP ที่มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ อากาศจะไหลผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล หลังจากนั้นอากาศไหลผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบที่ 27 ± 0.1 °C โดยอากาศที่ถูกควบคุมอุณหภูมิจะไหลเข้าสู่ส่วนทดสอบด้วยโรเตอร์ซีล การให้ความร้อนกับอากาศโดยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังฮีตเตอร์ผ่านชุดควบคุมอุณหภูมิ การวัดความเร็วที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูเจ็ทนั้นใช้ท่อพีไอทีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด 1.5 mm วัดความเร็วที่ตำแหน่งกึ่งกลางทั้ง 13 รู เพื่อนำไปคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์



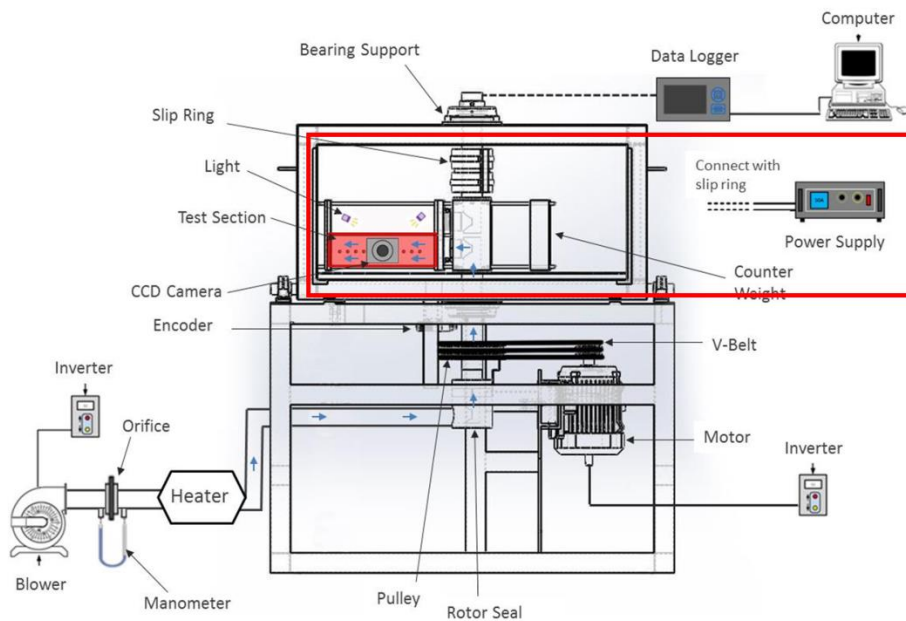
รูปที่ 3.5 รายละเอียดชุดทดลองในส่วนการหล่อเย็น

รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดชุดทดลองในส่วนการหมุน โดยส่วนทดสอบจะเป็นแขนการหมุนที่ถูกยึดกับ Coupling ที่ต่อกับเพลากลวงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 75 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 60 mm เพลากลูกรองรับตัวแบริงขนาดใหญ่ 2 ตัว เพลานี้ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 10 HP ที่มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ ส่งกำลังผ่านสายพานวีจำนวน 3 เส้น และที่เพลามีการวัดจำนวนรอบการหมุนด้วย Encoder



รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดชุดทดลองในส่วนการหมุน

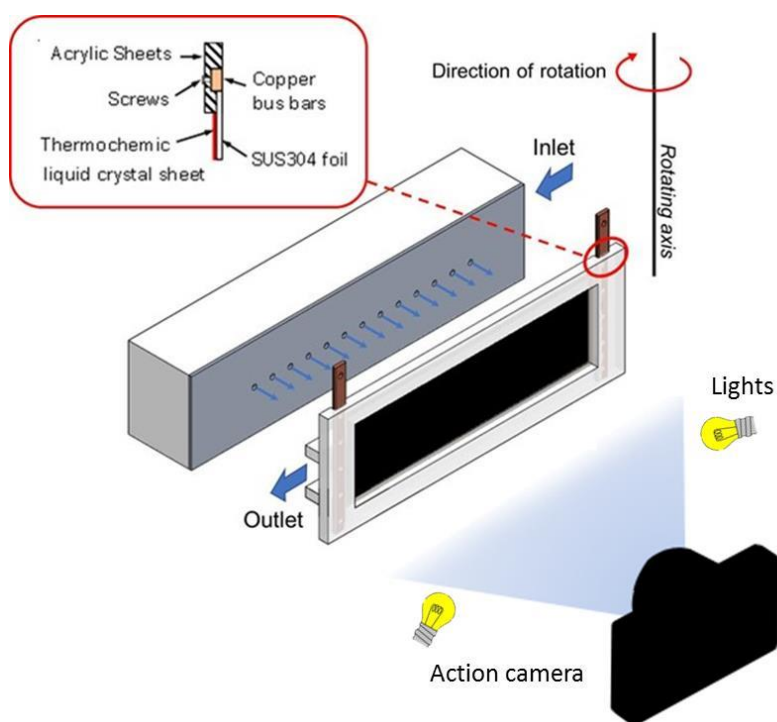
รูปที่ 3.7 แสดงรายละเอียดชุดทดลองในส่วนการสร้างฟลักซ์ความร้อน Power supply จ่ายกระแสผ่านทาง สองขั้วของวงแหวนลื่น (2P slip ring) ถูกยึดติดกับเพลากลวงหลัก โดยมีขนาด OD=120 mm, W=80 mm และต่อกับ เพื่อสร้างฟลักซ์ความร้อน 850 W/m^2 ผ่านก้ามปู ผ่านไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่วนทดสอบและยังเป็นแขนการหมุนของชุดทดลอง



รูปที่ 3.7 รายละเอียดชุดทดลองในส่วนการสร้างฟลักซ์ความร้อน

3.3 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 3.8 แสดงรายละเอียดส่วนทดสอบสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสำหรับผนังพุ่งชนที่ใช้ในการวัดการถ่ายเทความร้อนทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 10 mm และตรงกลางของแผ่นอะคริลิกจะเจาะเป็นหน้าต่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 90 mm x 270 mm หลังจากนั้นจึงแผ่นสแตนเลสบาง (SUS304 foil) ที่มีความหนา 0.03 mm ให้เรียบและตึงโดยใช้ทองแดงแท่งยึดแผ่นสแตนเลสบางไว้ทั้งสองข้างเพื่อเป็นขั้วสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นสแตนเลส ในการทดลองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าจาก Power supply ผ่านทองแดงแท่งไปยังแผ่นสแตนเลส ในการทดลองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านทองแดงแท่งไปยังแผ่นสแตนเลสบางจนเกิดความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น จากนั้นวัดกระแสไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าเพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลสที่เป็นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.8 รายละเอียดส่วนทดสอบที่ใช้วัดการถ่ายเทความร้อน

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านท่อทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสบาง จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งบริเวณแผ่นสแตนเลสบาง ซึ่งอัตราการเกิดความร้อน (\dot{Q}_{input}) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{input} = IV \quad (3.1)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส
 V คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดระหว่างแท่งทองแดงที่ขึงแผ่นสแตนเลส

สำหรับการทดลองนี้ใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องไหลผ่านพื้นผิวแผ่นสแตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว (h) ได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{A(T_w - T_m)} \quad (3.2)$$

โดยที่ \dot{Q}_{losses} คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อนจากผิวทดสอบไปสู่บรรยากาศ
 A คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน
 T_w คือ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งบนแผ่นสแตนเลส
 T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศก่อนและหลังไหลผ่านส่วนทดสอบ
 จากนั้นสามารถคำนวณค่านัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) บนพื้นผิวได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.3)$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (5 mm)
 k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย

สำหรับตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ของการไหลในส่วนทดสอบสามารถคำนวณจากสมการ

$$Re = \frac{V_c D}{\nu} \quad (3.4)$$

โดยที่ V_c คือ ความเร็วที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรูเจ็ท

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity) ของอากาศ

สำหรับค่าตัวเลขการหมุน สามารถคำนวณได้จาก

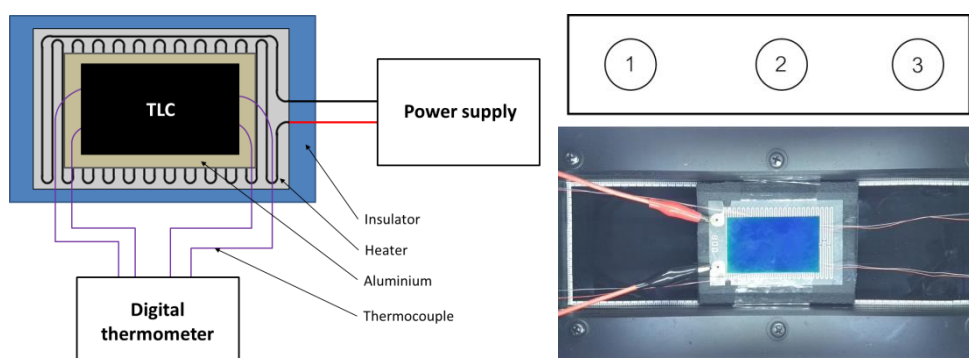
$$R_o = \frac{\Omega D}{V_c} \quad (3.5)$$

โดยที่ $\Omega = \frac{2\pi N}{60}$ คือ ค่าความเร็วเชิงมุม (rad/s)

N คือ ค่าความเร็วรอบของการหมุน (rpm)

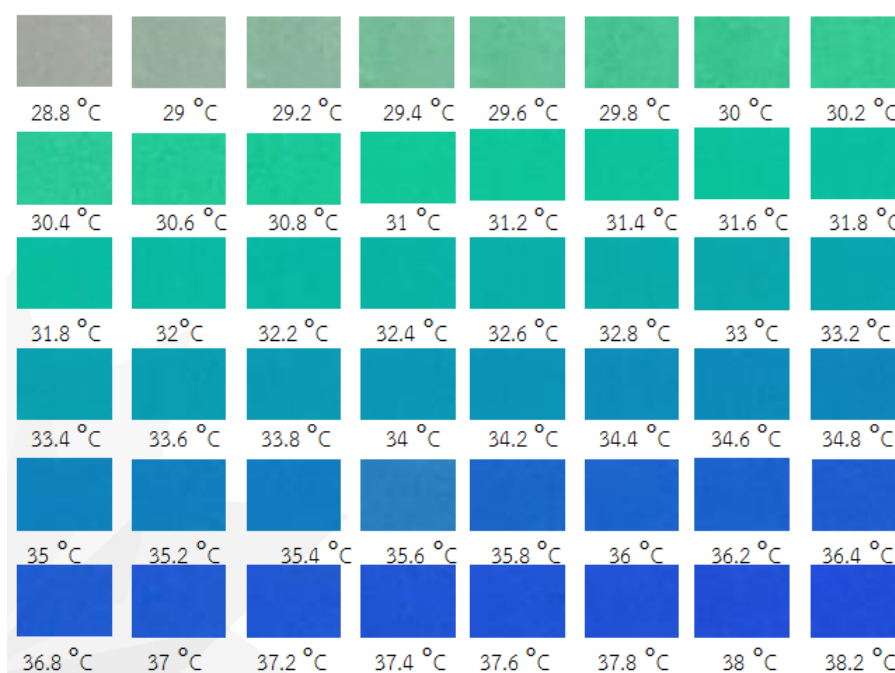
3.4 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล

การสอบเทียบสีมีความจำเป็นสำหรับการใช้วัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลใช้แผ่นฉนวนบางเพื่อให้ชุดสอบเทียบมีความสูงใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด เหนือแผ่นฉนวนติดตั้งฮีตเตอร์ที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ด้านบนของฮีตเตอร์วางทับด้วยแผ่นอะลูมิเนียมหนา 2 mm มีหน้าที่กระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่นและเพิ่มความเสถียรในการสอบเทียบ ด้านบนของแผ่นอะลูมิเนียมติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 4 จุด เพื่อวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดมาทำการเฉลี่ยค่าเพื่อเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่ทำการบันทึกภาพ บนแผ่นอะลูมิเนียมที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลนี้ถูกติดทับด้วยแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีและทำการบันทึกภาพ โดยในการสอบเทียบสีนี้ได้กำหนดเงื่อนไขให้เหมือนในสถานการณ์ทดลองจริง ได้แก่ ตำแหน่งของกล้อง และการให้แสงสว่างระหว่างการบันทึกภาพ



รูปที่ 3.9 ชุดทดลองและตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบ

สำหรับการสอบเทียบสีกำหนดตำแหน่งอุปกรณ์ให้อยู่ในสถานะเดียวกับการทดลอง จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์จนอุณหภูมิของแผ่นอะลูมิเนียมสูงกว่า $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลจะแสดงสีตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ทำการบันทึกภาพจากแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเมื่ออุณหภูมิของแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.10 หลังจากนั้นทำซ้ำลักษณะเดียวกันโดยลดกระแสที่จ่ายไปยังแผ่นอะลูมิเนียมบันทึกภาพทุกครั้งที่อุณหภูมิลดลง $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำการบันทึกถึงอุณหภูมิที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตัวประกอบเฉดสี Hue ที่สร้างขึ้นเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบทั้ง 3 บริเวณ พบว่าเส้นสมการสามารถใช้ทำนายอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีอยู่ในช่วง $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

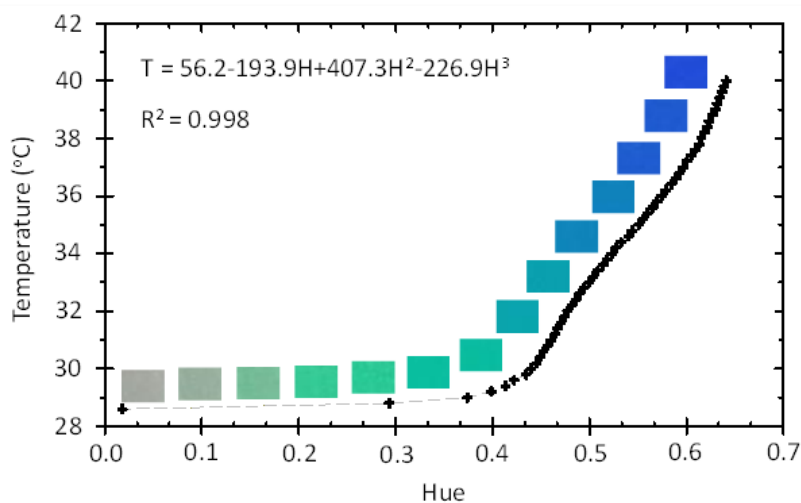
$$r = \frac{R - RB}{R_{\max} - RB} \quad (3.6)$$

$$g = \frac{G - GB}{G_{\max} - GB} \quad (3.7)$$

$$b = \frac{B - BB}{B_{\max} - BB} \quad (3.8)$$

โดยที่	R	คือ	ความเข้มของสีแดงของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล
	G	คือ	ความเข้มของสีเขียวของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล
	B	คือ	ความเข้มของสีน้ำเงินของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล
	R_{\max}	คือ	ความเข้มสูงสุดของสีแดงที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ
	G_{\max}	คือ	ความเข้มสูงสุดของสีเขียวที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ
	B_{\max}	คือ	ความเข้มสูงสุดของสีน้ำเงินที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลแสดงในช่วงสอบเทียบอุณหภูมิ
	RB	คือ	ความเข้มของสีแดงที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี
	GB	คือ	ความเข้มของสีเขียวที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี
	BB	คือ	ความเข้มของสีน้ำเงินที่เป็นรูปเริ่มต้นตอนที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี

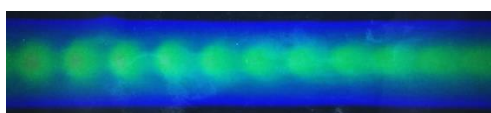
จากสมการที่ (3.6) - (3.8) ก็จะหาค่าเฉลี่ยความเข้มของสีในรูปที่ 3.10 ทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากนั้นสร้างกราฟโดยในแนวแกนตั้งแสดงระดับของอุณหภูมิและแกนนอนแสดงค่า Hue จะได้ความสัมพันธ์ของกราฟตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.11



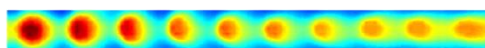
รูปที่ 3.11 กราฟสมการทำนายความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่า Hue

3.5 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

ในการหาการกระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว สามารถทำได้โดยการนำภาพถ่ายที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลมาวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรมที่ MATLAB เลือกรูปภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง โดยภายในภาพต้องแสดงสีในช่วงอุณหภูมิ 29 °C ถึง 40 °C โหลดไฟล์ภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรม MATLAB ตัดภาพถ่ายให้เหลือเฉพาะบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ นำภาพถ่ายมาทำการแยกองค์ประกอบของระบบสี RGB แล้วทำการแปลงข้อมูลสีเป็นระบบสีแทนค่าเฉดสี Hue ของแต่ละจุดภาพเพื่อหาข้อมูลการกระจายอุณหภูมิของแต่ละจุดภาพ และนำมาคำนวณหาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายทั้งพื้นผิว



(ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล



(ข) การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์

รูปที่ 3.12 การแปลงภาพถ่ายเป็นภาพการกระจายค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว

3.6 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน

การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน เป็นการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อนในส่วนทดสอบ ซึ่งในการสร้างโมเดลส่วนทดสอบ การกำหนดเงื่อนไขของการทดสอบ และการจำลองนั้นได้ใช้โปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ในการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เทคนิคการจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่ออธิบายลักษณะการไหลและปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนจะอธิบายดังหัวข้อต่อไปนี้

3.6.1 สมการควบคุมการไหล

พฤติกรรมของการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลัก 3 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง (Reynolds Averaged Continuity Equation) สมการ Reynolds Averaged Navier Stokes (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Reynolds Averaged Energy Equation) ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง Reynolds Averaged (Continuity Equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.9)$$

สมการ Reynolds Averaged Navier Stokes (Momentum equation)

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{V_i V_j} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (3.10)$$

สมการพลังงาน Reynolds Averaged (Energy Equation)

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{V_i T} \right] \quad (3.11)$$

โดยที่ c_p คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
 U_i คือ ส่วนประกอบของความเร็วเฉลี่ย
 T คือ อุณหภูมิของของไหล

3.6.2 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model)

ที่ผ่านมาการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) ขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งแบบจำลองส่วนใหญ่สร้างบนพื้นฐานของ Two-equation model โดยที่แนวคิดแบบนี้ใช้ Boussinesq approximation ร่วมกับสมการ Kinetic energy และ Auxiliary เช่น Dissipation rate (ε), Turbulence length scale (l), Specific dissipation rate (ω) เป็นต้น

(1) แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ model

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \varepsilon$ model เป็นแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่ง่ายและสมบูรณ์ที่สุดในการใช้ทำนายการไหล ซึ่งใช้สมการการเคลื่อนที่ในการคำนวณเพียง 2 สมการ คือ สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ปั่นป่วน และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการสลายปั่นป่วน แบบจำลองนี้ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม

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

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.12)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.13)$$

โดยที่ μ_t คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน (Eddy viscosity)

k คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy)

ε คือ อัตราการสลายแบบปั่นป่วน (Dissipation rate)

จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) จึงเขียนความสัมพันธ์ของสมการที่ใช้จำลองการไหลแบบปั่นป่วนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.15)$$

โดยที่ G_k คือ อัตราการเกิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

G_b คือ อัตราการเกิดความปั่นป่วนที่เกิดจากการจำลอง

Y_M คือ ผลการขยายความผันผวนของอัตราการสลายปั่นป่วน

σ_k คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน

σ_ϵ คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายปั่นป่วน

โดยค่าคงที่คือ $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\epsilon = 1.30$

(2) แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ model

แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยคาดว่าจะสามารถใช้ในการอธิบายถึงคุณลักษณะของปรากฏการณ์การไหลหมุนวน (Recirculating flow phenomena) ได้ เนื่องจากสมการ Specific dissipation rate (ω) สามารถให้ผลเฉลยที่เสมือนว่าค่า Turbulent kinetic energy มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และไม่ต้องใช้ Damping function ในการคำนวณบริเวณ Viscous sublayer อีกด้วย และแบบจำลองนี้ถูกประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรมต่างๆไป ซึ่งผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงกว่า Two-equation model แบบอื่นๆ สำหรับการทำนายการไหลแบบ Adverse pressure gradient และการไหลแบบแยกตัว (Separate flows) อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อพิสูจน์ที่ชัดเจนในการอธิบายถึงควมมีประสิทธิภาพของแบบจำลองนี้สำหรับการทำนายการไหลหมุนวน ซึ่งแบบจำลอง $k - \omega$ จัดเป็น Two-equation model ที่ได้รับความสนใจศึกษาอีกแบบหนึ่ง

สมการ Turbulent kinetic energy ที่ใช้ในแบบจำลอง $k - \omega$ หาได้โดยอาศัยสมการ Turbulent kinetic energy ที่ใช้ในแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ ร่วมกับความสัมพันธ์ $\epsilon = \beta \omega k$ (เมื่อ β คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ $3/40$ ทำให้ได้สมการ Turbulent kinetic energy คือ

$$\overline{\rho u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = R_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (3.16)$$

สมการ Specific dissipation rate, ω คือ อัตราการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยปริมาตรและต่อเวลา ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\omega \approx k^2 / \ell \quad (3.17)$$

สมการ Turbulence length scale, ℓ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\ell = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.18)$$

นิยามสมการ ω โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ω และ k ดังนี้

$$\omega \equiv \frac{\varepsilon}{k} \quad (3.19)$$

ดังนั้นสมการของ ω ซึ่งพัฒนาโดย Bredberg et al. [1] สามารถหาได้จากสมการ

$$\rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.20)$$

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น บริเวณใกล้ผนังจะมีผลของความหนืดและ Turbulence ซึ่งเป็นอิทธิพลที่สำคัญต่อการไหล โดยที่ค่าความเร็วจะขึ้นอยู่กับ Boundary layer ซึ่งในที่นี้การคำนวณค่าความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังจากวิธี Wall function

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ $k = x^{-\beta^*/\beta}$ โดยที่ $\beta^*/\beta \approx 1.00-1.25$ ดังนั้น

$$\alpha = \frac{\beta^*}{\beta} - \frac{K^2}{\sigma_\omega \sqrt{\alpha^* \beta^*}} \quad (3.21)$$

ค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ดังนี้

$$\alpha^* = 1, \alpha = 5/9, \beta^* = 9/100, \beta = 3/40, \sigma_\omega = 2 \text{ และ } \sigma_k = 2$$

(3) แบบจำลองความปั่นป่วน S SST k- ω model

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Shear stress transport k- ω model (SST k- ω model) พัฒนาโดย Menter's ได้รวมเอาแบบจำลอง 2 ชนิด ผสมผสานเข้าด้วยกันระหว่างการจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นไกลจากผนัง (Outer layer) และการจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ω model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นชิดผนัง (Inner layer) ซึ่งการสลับเปลี่ยนแบบจำลองสามารถทำได้โดยใช้ Blending function ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของแบบจำลอง

นอกจากนี้แบบจำลองแบบ SST k- ω model ได้ทำการปรับปรุงค่า Eddy viscosity โดยการบังคับค่า Turbulent shear stress ให้มีขอบเขตการปรับปรุงนี้ทำให้การทำนายการไหลที่มี Adverse pressure gradient, Airfoils และ Transonic shock-waves ได้ดีขึ้น

สมการพลังงานความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j k)}{\partial x_j} = \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.22)$$

สมการอัตราการผลิตเฉพาะ (Specific dissipation rate, ω)

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha}{\nu_t} \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.23)$$

สมการ Blending function, F_1

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega^2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (3.24)$$

เมื่อ

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (3.25)$$

สมการความหนืดแบบปั่นป่วน (Turbulent viscosity)

$$\mu_t = \min\left(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{SF_2}\right); a_1 = 0.31 \quad (3.26)$$

สมการ Blending function, F_2

$$F_2 = \tanh\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right)\right]^2 \quad (3.27)$$

สำหรับ Blending function, F_1 มีค่าเท่ากับ 1 ที่ขอบชั้นขีตผิวและมีค่าเข้าสู่ 0 เมื่อห่างออกจากขอบของชั้นขีตผิว (Free stream)

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองดั้งเดิมกำหนดเป็นดังนี้

1. สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านในชั้นขีตผิว (Inner layer)

$$\sigma_k = 1.176, \sigma_\omega = 2, \alpha = 0.5532, \beta = 0.075 \text{ และ } \beta^* = 0.09$$

2. สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านนอกชั้นขีตผิว (Outer layer)

$$\sigma_k = 1, \sigma_{\omega_2} = 1.168, \alpha = 0.4403, \beta = 0.0828 \text{ และ } \beta^* = 0.09$$

โดยที่

τ_w คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress)

σ_k คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน

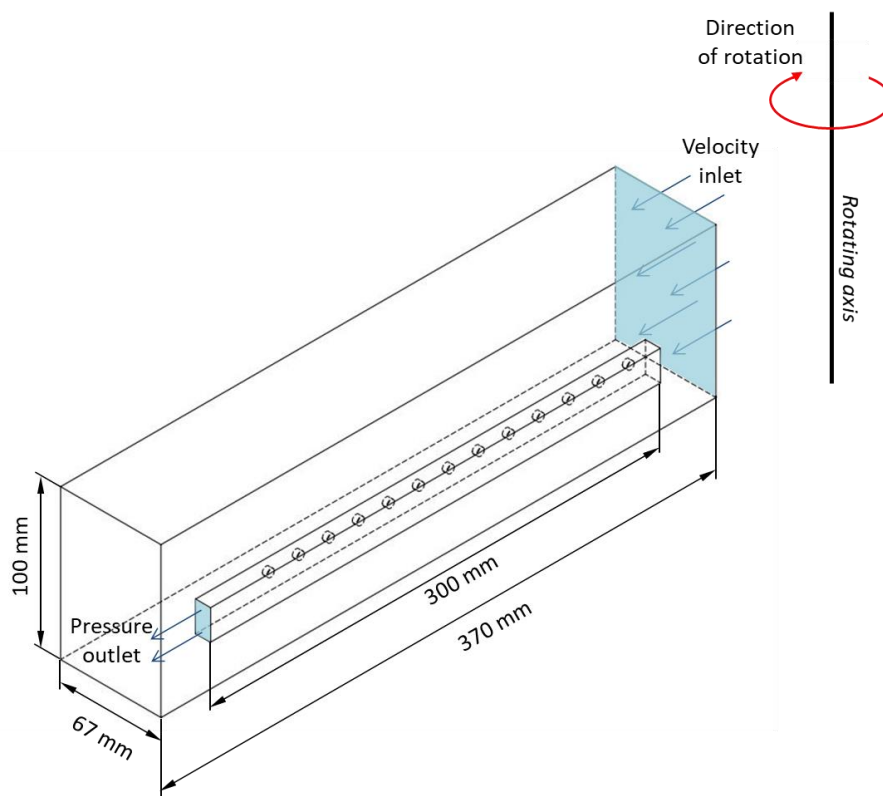
σ_ω คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายเฉพาะ

ν_t คือ ความหนืดไหลวนคิเนเมติก (Kinematic eddy viscosity)

CD_{kw} คือ การแพร่ผ่านในแนวขวาง (Cross-diffusion)

3.6.3 การสร้างโมเดลจำลองการไหล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ในการจำลองการไหลมีการกำหนดขนาดและเงื่อนไขขอบเขตของโมเดลเหมือนกับการทดลองจริง การจำลองการไหลแบ่งรูปแบบทางออกของช่องการไหลออกเป็น 3 รูปแบบ คือ Single radius outward exit, Single radius inward exit และ Two-way exits ที่ระยะพุ่งชนเท่ากับ 2D และ 6D ในการจำลองมีการศึกษาการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หยุดนิ่งและมีการหมุน โดยตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.13 และเงื่อนไขตัวแปรในการจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.3

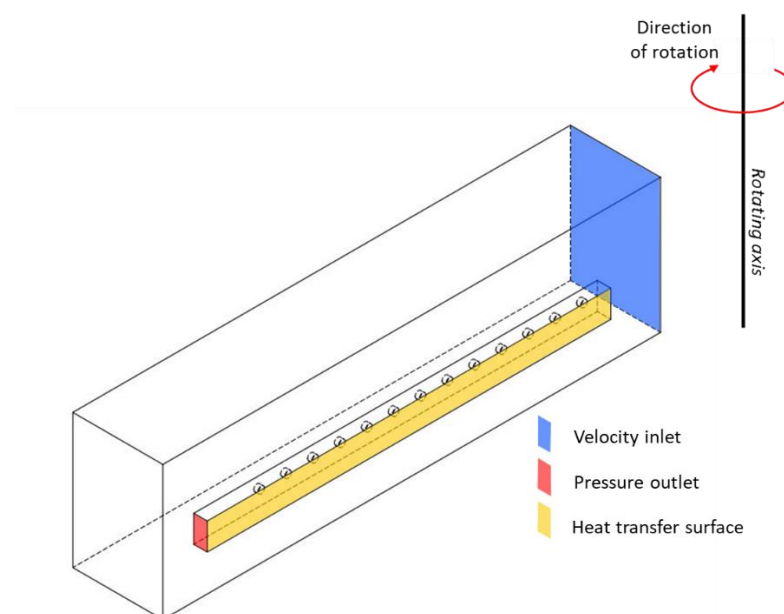


รูปที่ 3.13 แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหล

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชน

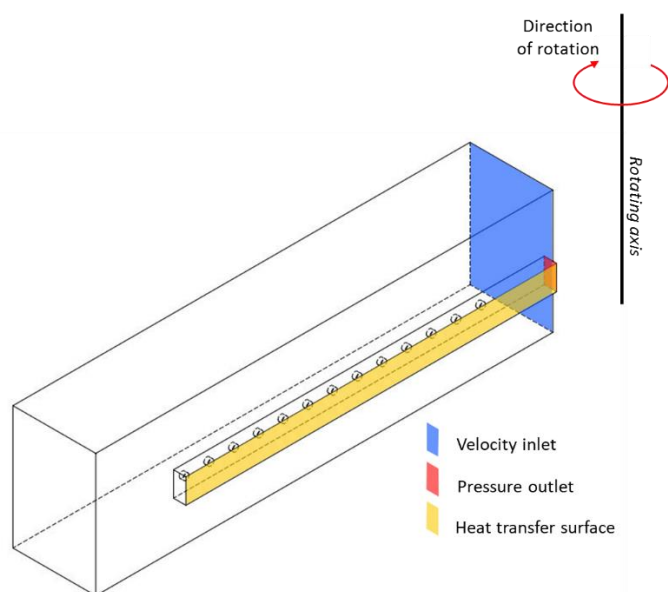
ตัวแปร	กำหนดค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท (D)	5 mm
ความหนาของแผ่นออริฟิส (t)	3 mm
ระยะห่างระหว่างเจ็ท (S)	4D
ความกว้างของช่องการไหล (W)	4D
ระยะพุ่งชน (H)	2D และ 6D
ตัวเลขการหมุน (R_o)	0 และ 0.0069
ความเร็วรอบการหมุน (N)	0 และ 250 rpm
ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re)	9,000
รูปแบบทางออก	Single radius outward exit, Single radius inward exit และ Two-way exits

รูปที่ 3.14 แสดงโมเดลแบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Single radius outward exit ลักษณะของโมเดลจะมีอากาศไหลเข้าที่ Jet chamber มีความสูง 100 mm ความกว้าง 67 mm หลังจากนั้นผ่าน Jet plate ที่มีความหนา 3mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 mm เป็นลำเจ็ททั้ง 13 ลำ พุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วไหลออกที่ทางออกของช่องการไหลบริเวณหันเข้าหาแกนหมุน ช่องการไหลมีความกว้าง 20 mm ระยะพุ่งชนที่ 2D และ 6D ความยาวของช่องการไหลถึงทางออกยาว 300 mm



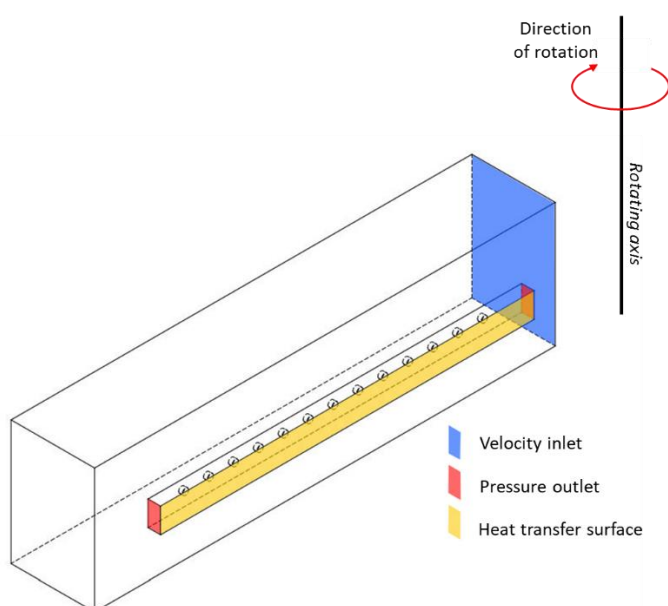
รูปที่ 3.14 แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Single radius outward exit

รูปที่ 3.15 แสดงโมเดลแบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Single radius inward exit ลักษณะของโมเดลจะมีอากาศไหลเข้าที่ Jet chamber มีความสูง 100 mm ความกว้าง 67 mm หลังจากนั้นผ่าน Jet plate ที่มีความหนา 3mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 mm เป็นลำเจ็ททั้ง 13 ลำ พุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วไหลออกที่ทางออกของช่องการไหลบริเวณหันออกจากแกนหมุน ช่องการไหลมีความกว้าง 20 mm ระยะพุ่งชนที่ 2D และ 6D ความยาวของช่องการไหลถึงทางออกยาว 290 mm



รูปที่ 3.15 แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Single radius inward exit

รูปที่ 3.16 แสดงโมเดลแบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Two-way exits ลักษณะของโมเดลจะมีอากาศไหลเข้าที่ Jet chamber มีความสูง 100 mm ความกว้าง 67 mm หลังจากนั้นผ่าน Jet plate ที่มีความหนา 3mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 mm เป็นลำเจ็ททั้ง 13 ลำ พุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วไหลออกที่ทางออกของช่องการไหลสองทางทั้งหันเข้าและออกจากแกนหมุน ช่องการไหลมีความกว้าง 20 mm ระยะพุ่งชนที่ 2D และ 6D ความยาวของช่องการไหลถึงทางออกยาว 300 mm



รูปที่ 3.16 แบบจำลองเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Two-way exits

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary layer) ที่ใช้ในการจำลองการไหล กำหนดให้ปากทางเข้าของ Jet chamber เป็นแบบ Velocity inlet ทางออกของช่องการไหลเป็นแบบ Pressure outlet ผนังให้เป็นแบบ Wall และพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมามีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 850 W/m^2 การกำหนดความเร็วตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางเข้า ขอบเขตทางออกและขอบเขตผนังได้กำหนดดังนี้

เงื่อนไขขอบเขตทางเข้า (Inlet boundary condition)

-กำหนดความเร็วทางเข้า $V=1.05 \text{ m/s}$ ($Re=9,000$) อุณหภูมิอากาศทางเข้า $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (300.15 K) ซึ่งเท่ากับที่ใช้ในการทดลองจริง

เงื่อนไขขอบเขตทางออก (Outlet boundary condition)

-กำหนดให้ความดันตรงทางออกของช่องการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจมีค่าเท่ากับ 0 Pa)

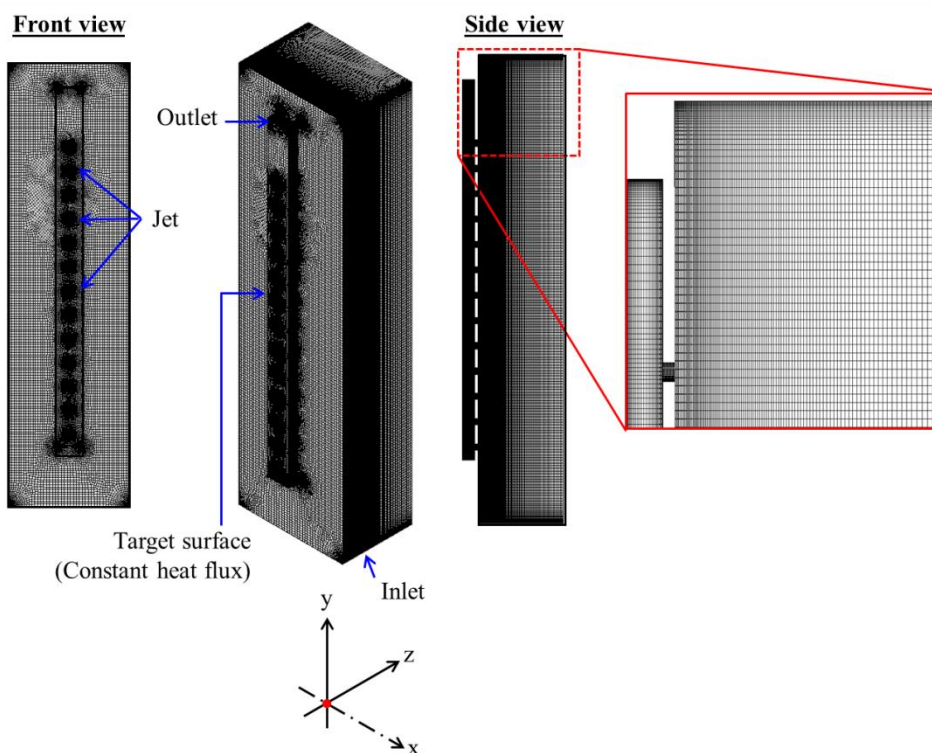
เงื่อนไขขอบเขตผนัง (Wall boundary condition)

-กำหนดให้ผนังไม่มีการไถล (No slip) และมีความเร็วเป็นศูนย์ในกรณีที่ช่องการไหลหยุดนิ่ง

-กำหนดให้มีการไถล (Moving wall) และมีความเร็วเท่ากับ 250 rpm ในกรณีที่ช่องการไหลมีการหมุน

3.6.4 การสร้างกริดและวิธีการคำนวณ

รูปที่ 3.17 แสดงรายละเอียดการสร้างกริดกรณีสรูปแบบทางออกของช่องการไหลแบบ Single radius outward exit โดยบริเวณช่องการไหลที่มีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีความละเอียดสูงซึ่งจะมีความละเอียดจากปลายทั้งสองข้าง บริเวณ Jet chamber จะมีความละเอียดลดลงเมื่อห่างจากแผ่นออริฟิส ความละเอียดบริเวณลำเจ็ทจะมีความละเอียดสูงเท่ากันทั้งหมดและช่องการไหลกำหนดให้หมุนรอบแกน x โดยมีรัศมีของแขนการหมุนเฉลี่ยเท่ากับ 315 mm



รูปที่ 3.17 รายละเอียดการสร้างกริดกรณีรูปแบบทางออก Single radius outward exit

ในการจำลองการไหลได้ทำการวิเคราะห์การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady flow) ไม่พิจารณาผลของการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองมีค่าคงที่ ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง สำหรับโมเดลความปั่นป่วนใช้แบบจำลองการไหล $k-\varepsilon$ (2 สมการ) และใช้ Realizable Standard Wall Functions กำหนดเงื่อนไขการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ 1×10^{-4} เท่ากับ รายละเอียดเงื่อนไขการคำนวณแสดงใน ตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การกำหนดรายละเอียดเงื่อนไขการคำนวณ

สมการ	วิธีการคำนวณ
Gradient	Least squares cell based
Pressure	Second order upwind
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy, k	Second order upwind
Specific dissipation rate, ω	Second order upwind
Energy	Second order upwind

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทที่ 4 ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ได้แสดงผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชน เป็นผลการทดลองที่แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชน โดยแสดงการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ซึ่งมีการเปรียบเทียบผลของความรอบที่เพิ่มขึ้นต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน รวมถึงมีการแสดงผลของรูปแบบที่ต่างกันของทางออกของช่องการไหลต่อการถ่ายเทความร้อนอยู่ในเอกสารบทนี้อีกด้วย และแสดงพฤติกรรมการไหลภายในช่องการไหลที่หมุนจากการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS Ver.15.0 (Fluent) เพื่อแสดงประกอบกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มกับผลการทดลองในส่วนแรก

4.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีรูปแบบทางออก Single radius inward exit

ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน ถูกแสดงในรูปของการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ ทำให้ทราบบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงและต่ำ บริเวณที่ถูกครอบงำจากอิทธิพลของกระแสไหลตัด จากความเร็วรอบการหมุนที่เปลี่ยนไป ทิศทางของการหมุนที่ส่งผลต่อผนังพุ่งชน โดยผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายใต้เงื่อนไข ความเร็วรอบที่ 0, 50, 100, 150, 200 และ 250 rpm มีทิศทางการหมุนที่ต่างกันเพื่อเกิดเป็นผนังด้าน Leading และ Trailing เรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ 6,000, 7,500 และ 9,000 ซึ่งผลการทดลองมีจำนวนมากและมีแนวโน้มใกล้เคียงกันจึงนำเสนอแสดงและเปรียบเทียบเพียงแค่ เรย์โนลด์นัมเบอร์ เท่ากับ 9,000 เพื่อสังเกตพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุนโดยใช้รูปแบบทางออก Single radius inward exit ที่มีทางออกของช่องการไหลเพียง 1 ทางและมีตำแหน่งไหลเข้าหาแกนการหมุน โดยมีการเปลี่ยนระยะพุ่งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ โดยจะอธิบายในแต่ละค่าระยะพุ่งชน

(1) กรณีที่ระยะพุ่งชน $H=2D$

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลรูปแบบทางออก Single radius inward exit ที่ระยะพุ่งชนเท่ากับ 2D รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius inside exit ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ตัวเลขการหมุน $Ro=0$ จะเห็นได้ว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะสูงสุดที่ช่องก่อนกระแสไหล (Upstream) และค่อยๆลดลงตามตำแหน่ง X/D ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลมาจากอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่รบกวนการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหล อีกทั้งยังทำให้ลำเจ็ทที่ตำแหน่งใกล้ทางออกเอียงตัวออกไปจากตำแหน่งรูเจ็ทอีกด้วย

เมื่อพิจารณากรณีผนังด้าน Leading ตัวเลขการหมุน $Ro=0.0009$ ถึง 0.0046 (คำนวณจากความเร็รรอบการหมุนตั้งแต่ 50 ถึง 250 rpm โดยที่ทิศทางของเจ็ทมีทิศทางเดียวกับการหมุน) ในรูปแบบทางออกของช่องการไหลรูปแบบนี้จะมีการมีทิศทางของแรงหนีศูนย์กลางตรงกันข้ามกับการไหลของกระแสไหลตัดภายในช่องการไหล พบว่าการหมุนทำให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Leading เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็รรอบ แต่ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นสูงสุดที่ตัวเลขการหมุน $Ro=0.0018$ หลังจากนั้นค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลงตามตามเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น กรณีผนังด้าน Trailing (ทิศทางของเจ็ทมีทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุน) พบว่าการหมุนทำให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Trailing เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็รรอบ แต่ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นสูงสุดที่ตัวเลขการหมุน $Ro=0.0009$ หลังจากนั้นค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลงตามตามเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น

(2) กรณีที่ระยะพุ่งชน $H=4D$

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ รูปแบบทางออก Single radius inside exit ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ตัวเลขการหมุน $Ro=0$ จะเห็นได้ว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะสูงสุดที่ตำแหน่งไกลจากแกนการหมุนและถูกรบกวนการถ่ายเทความร้อนจากกระแสไหลตัดทำให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวลดลงตามตำแหน่ง X/D ที่เพิ่มขึ้นจนมาถึง

ตำแหน่งใกล้ทางออก อย่างไรก็ตามค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ มีค่ามากกว่าที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ ในกรณีหยุดนิ่ง

เมื่อพิจารณากรณีที่มีการหมุนในรูปแบบทางออกนี้มีทิศทางของแรงหนีศูนย์กลางตรงกันข้ามกับกระแสไหลตัดภายในช่องการไหลที่พยายามจะออกมาจากช่องไหลอีกทั้งในด้าน Leading มีทิศทางของแรงโคริออลิสที่กระทำกับลำเจ็ทในทิศทางเสริมแรงกับแรงหนีศูนย์กลางอีกด้วย ผังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ค่าค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Leading บางส่วนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ที่ตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ ค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยในช่วงก่อนกระแสไหล (Upstream) มีค่ามากกว่ากรณีหยุดนิ่ง แต่ในช่วงหลังกระแสไหล (Downstream) กลับมีค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยน้อยกว่ากรณีหยุดนิ่ง และกรณีผนังด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ค่าค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Trailing เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ ที่ตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ มีค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุด หลังจากนั้นค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลงตามตามเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น

(3) กรณีที่ระยะพุ่งชน $H=6D$

รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ รูปแบบทางออก Single radius inside exit ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

กรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ตัวเลขการหมุน $R_o=0$ จะเห็นได้ว่าค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะสูงสุดที่ตำแหน่งหลังกระแสไหล (Downstream) มีค่าต่ำกว่าบริเวณก่อนกระแสไหล (Upstream) ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับรูปแบบทางออกเดียวที่ระยะพุ่งชนอื่น อีกทั้งค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ นี้ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับระยะพุ่งชน $H=2D$ และ $4D$

เมื่อพิจารณากรณีผนังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Leading เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ที่ตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ มีค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุด หลังจากนั้นค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลงตามตามเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น และที่ตัวเลขการหมุน $R_o=0.0028$ ถึง 0.0046 บริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ช่วง 2 ปีคสุดท้ายก่อนถึงตำแหน่งทางออกมีค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่ง และกรณีผนังด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ค่าค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Trailing เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ ที่ตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ มีค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุด หลังจากนั้นค่าตัวเลขค่าน้ำเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลงตามตามเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น

H=2D Re=9000

Single radius inward exit

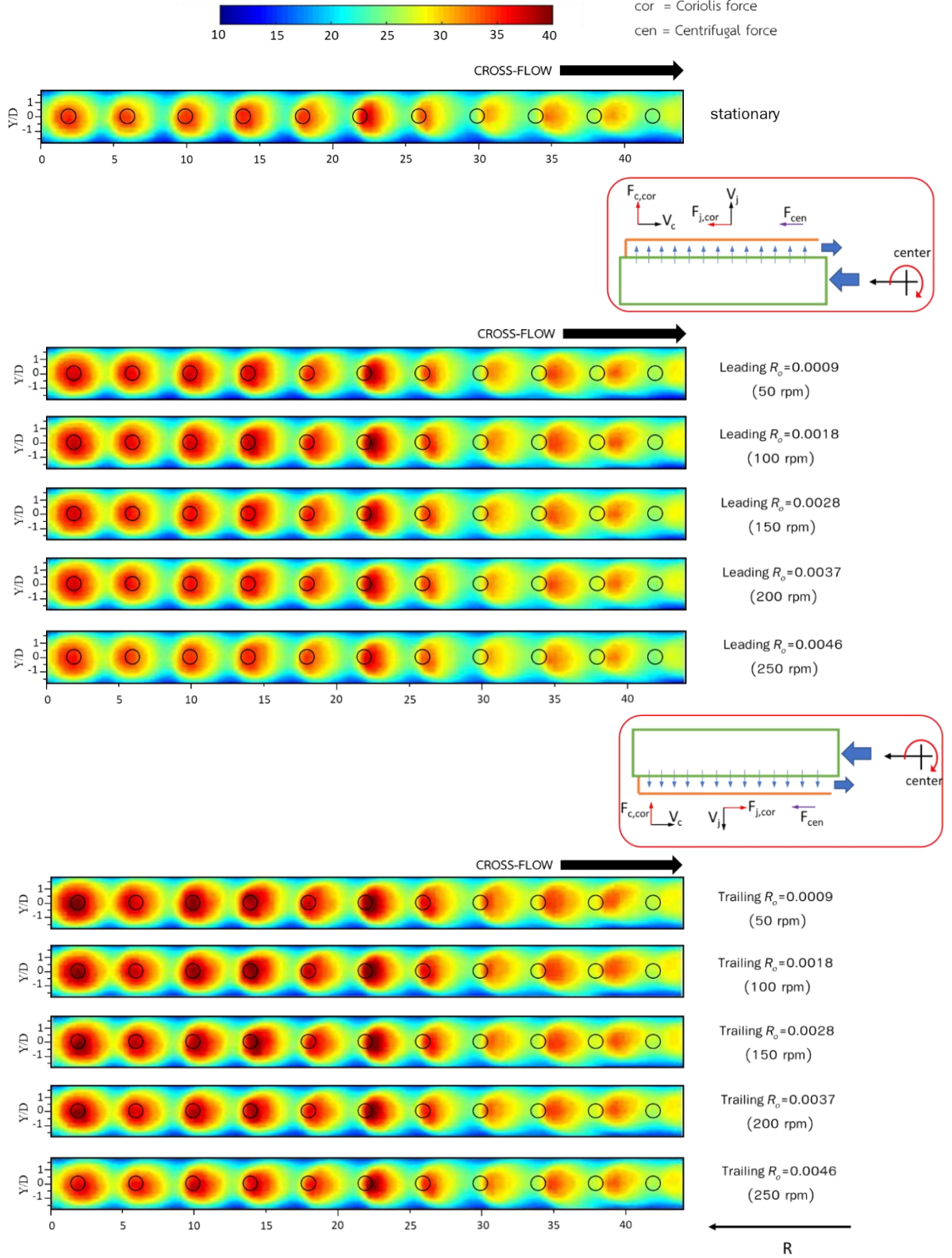
Subscripts

c = crossflow

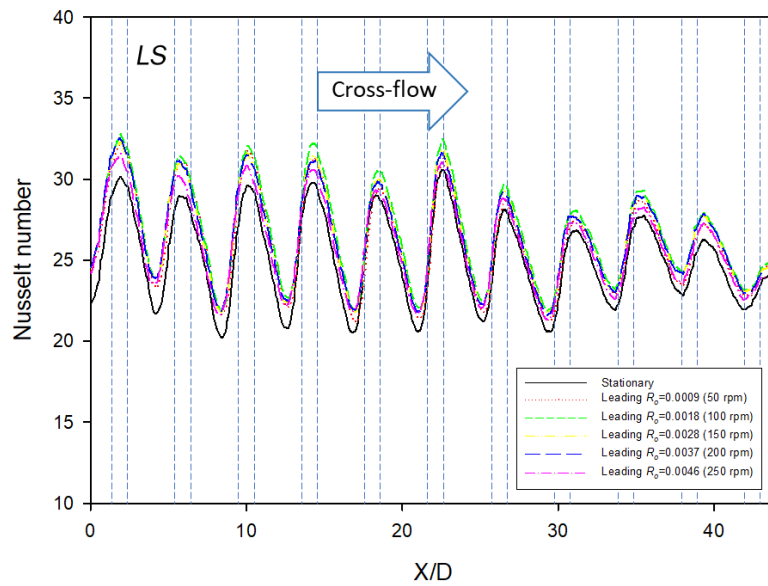
J = jet

cor = Coriolis force

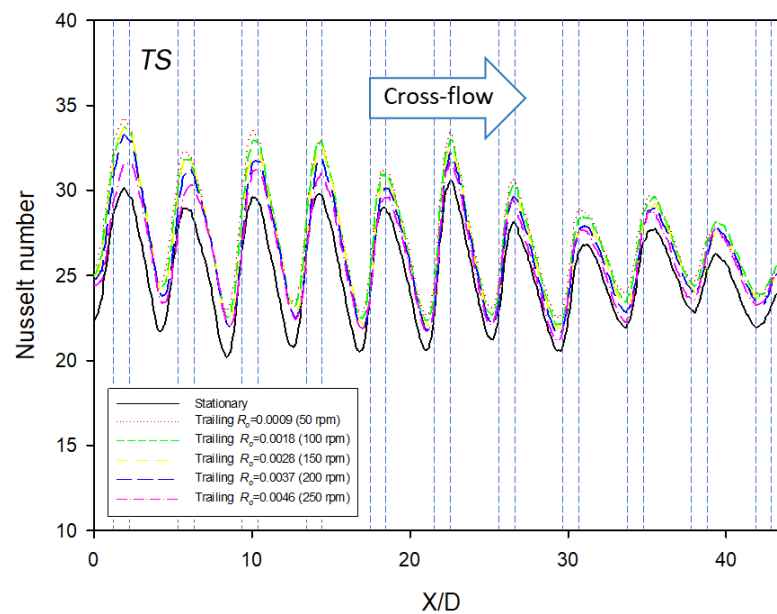
cen = Centrifugal force



รูปที่ 4.1 การกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)



รูปที่ 4.2 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)



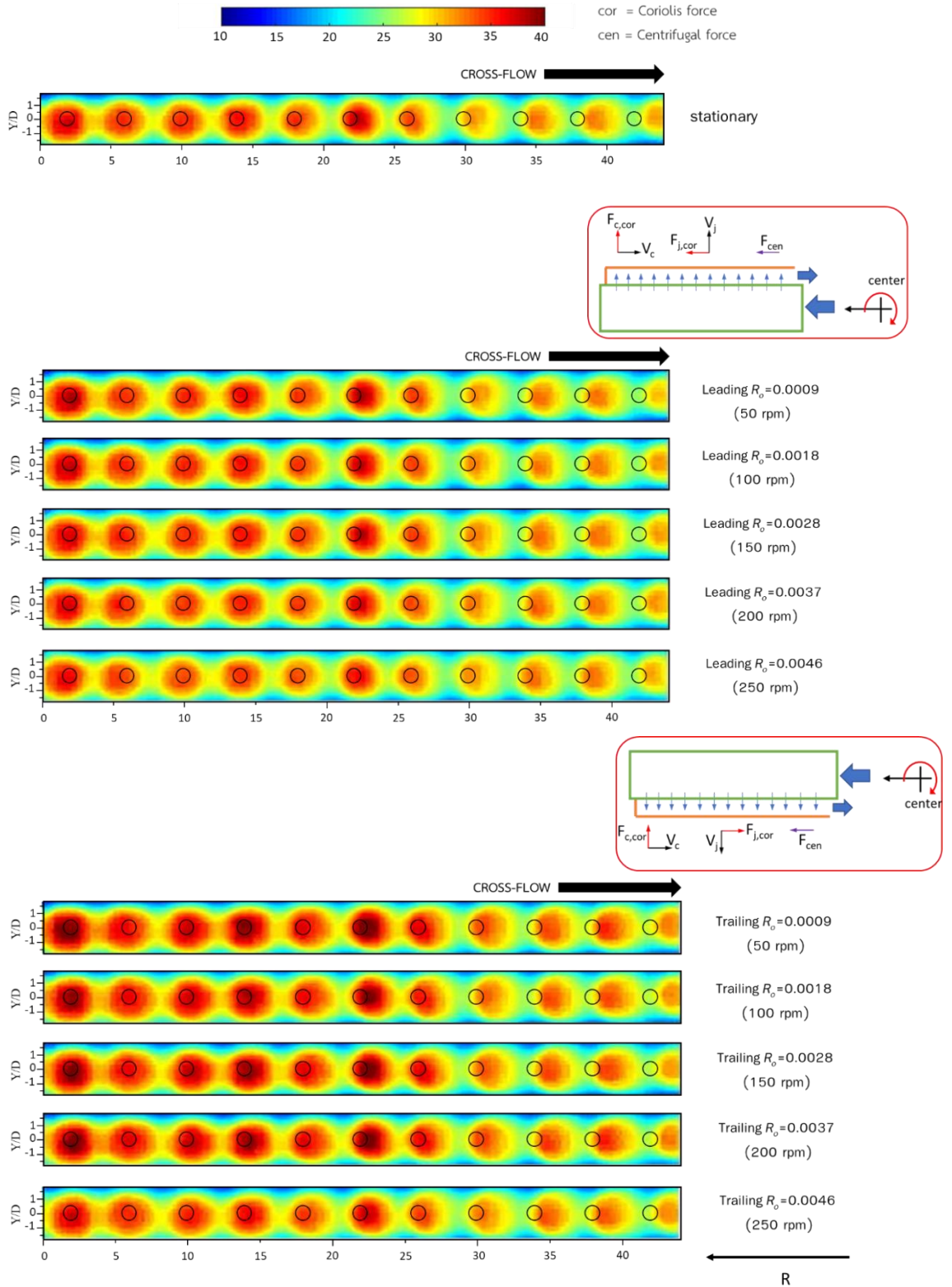
รูปที่ 4.3 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)

H=4D Re=9000

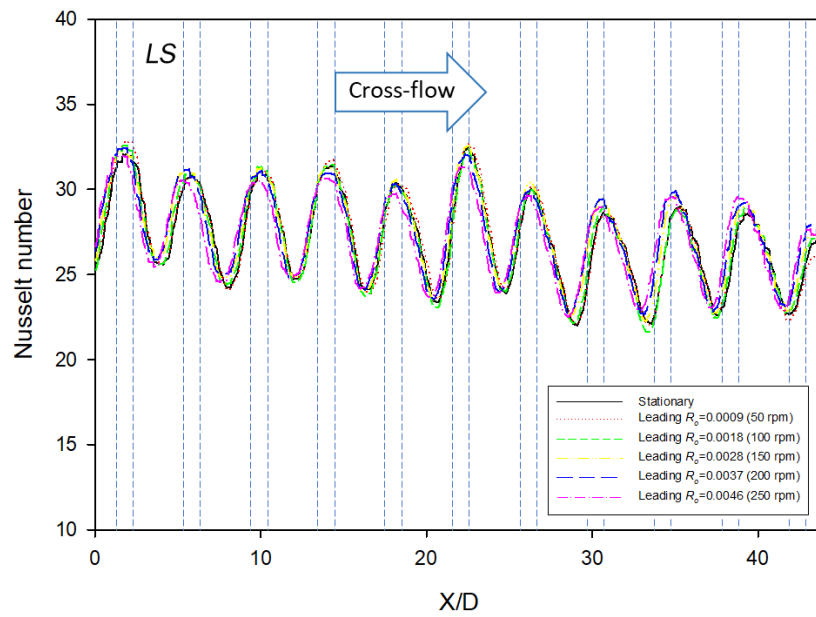
Single radius inward exit

Subscripts

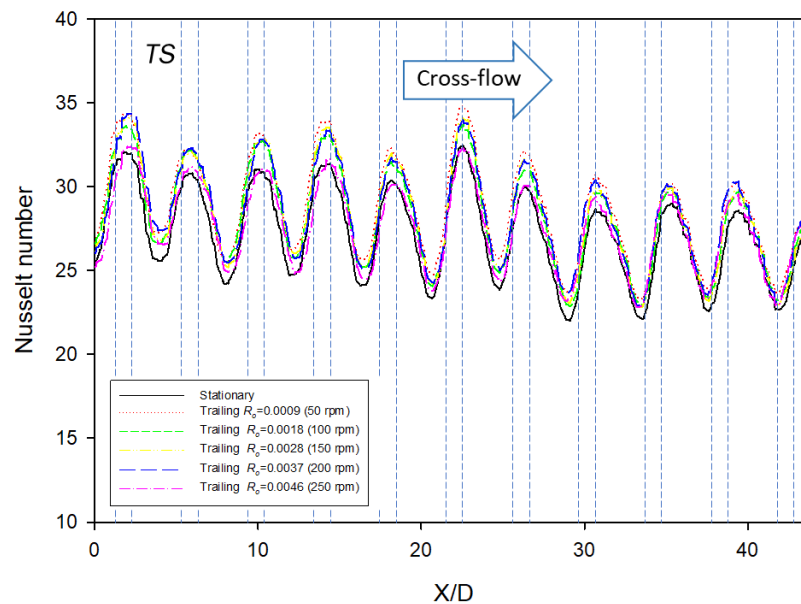
- c = crossflow
- J = jet
- cor = Coriolis force
- cen = Centrifugal force



รูปที่ 4.4 การกระจายของค่าสัมประสิทธิ์ด้นน์เบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=4D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)



รูปที่ 4.5 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)



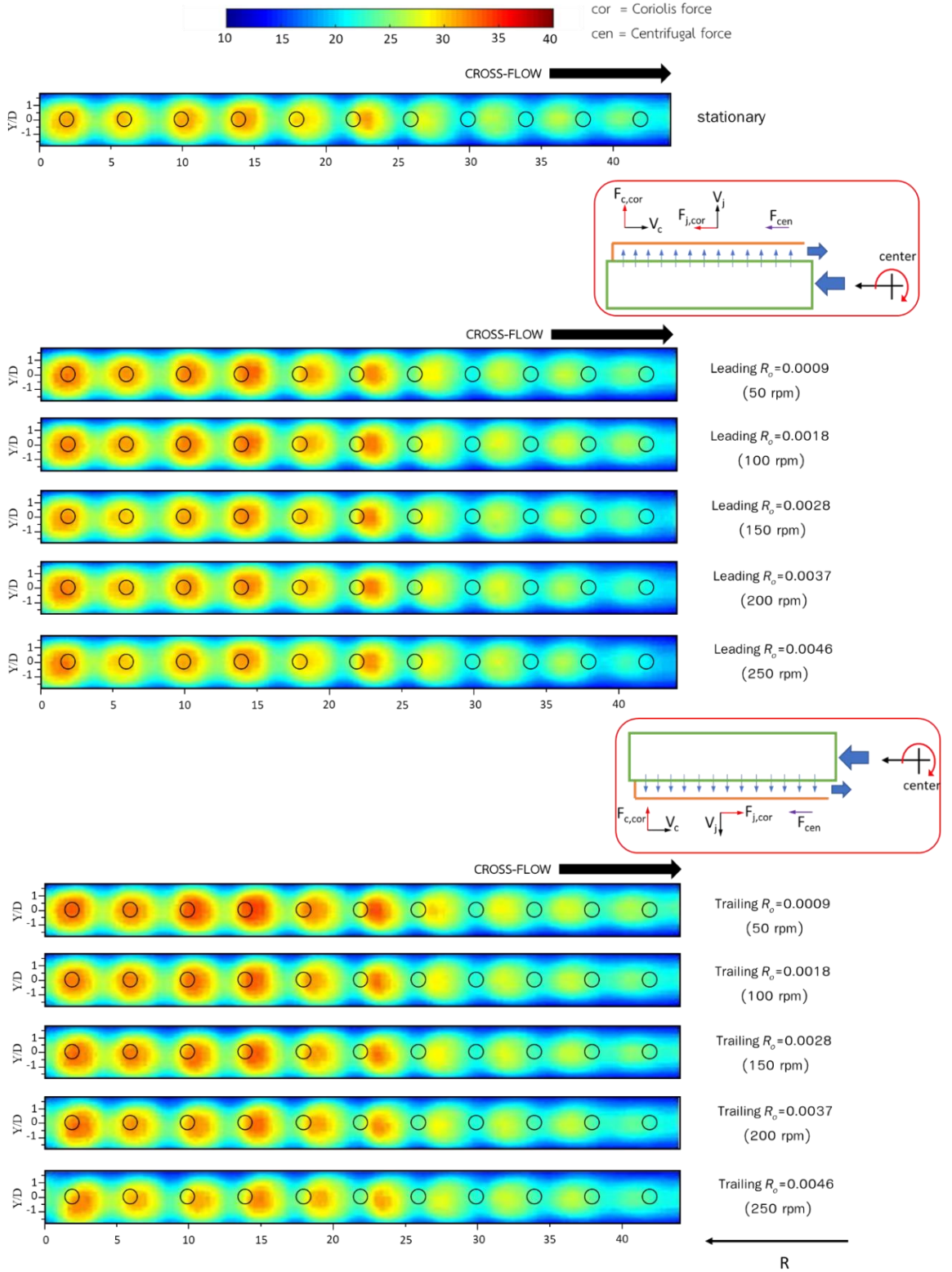
รูปที่ 4.6 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)

H=6D Re=9000

Single radius inward exit

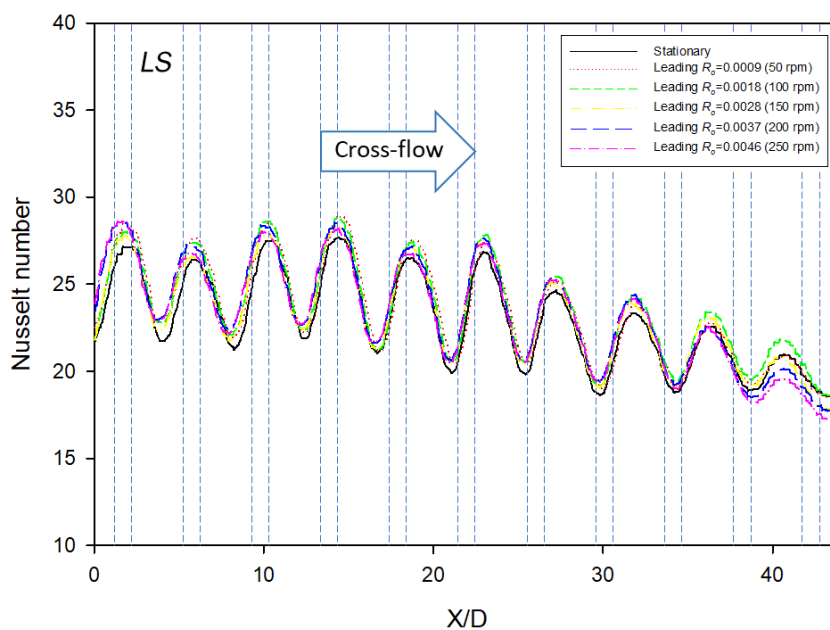
Subscripts

- c = crossflow
- J = jet
- cor = Coriolis force
- cen = Centrifugal force

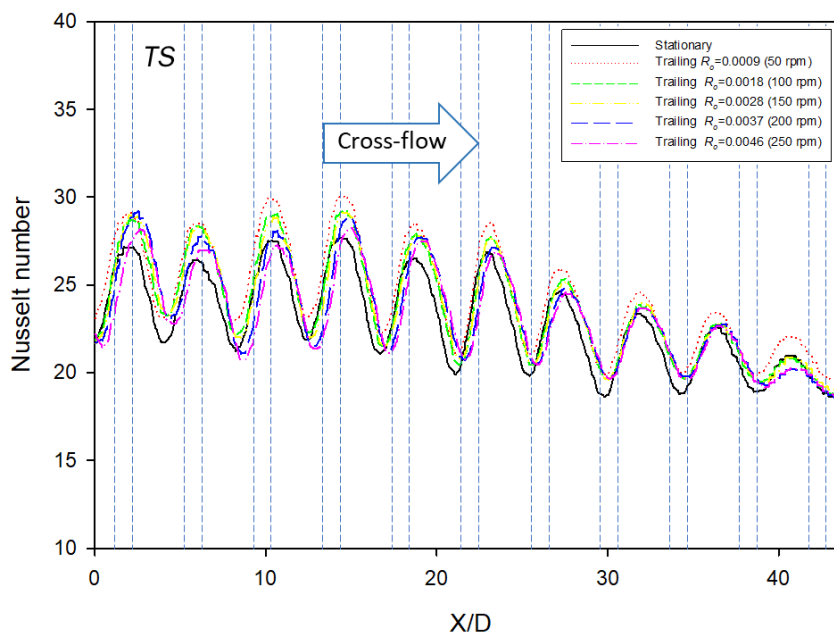


รูปที่ 4.7 การกระจายของค่าสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=6D

รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)



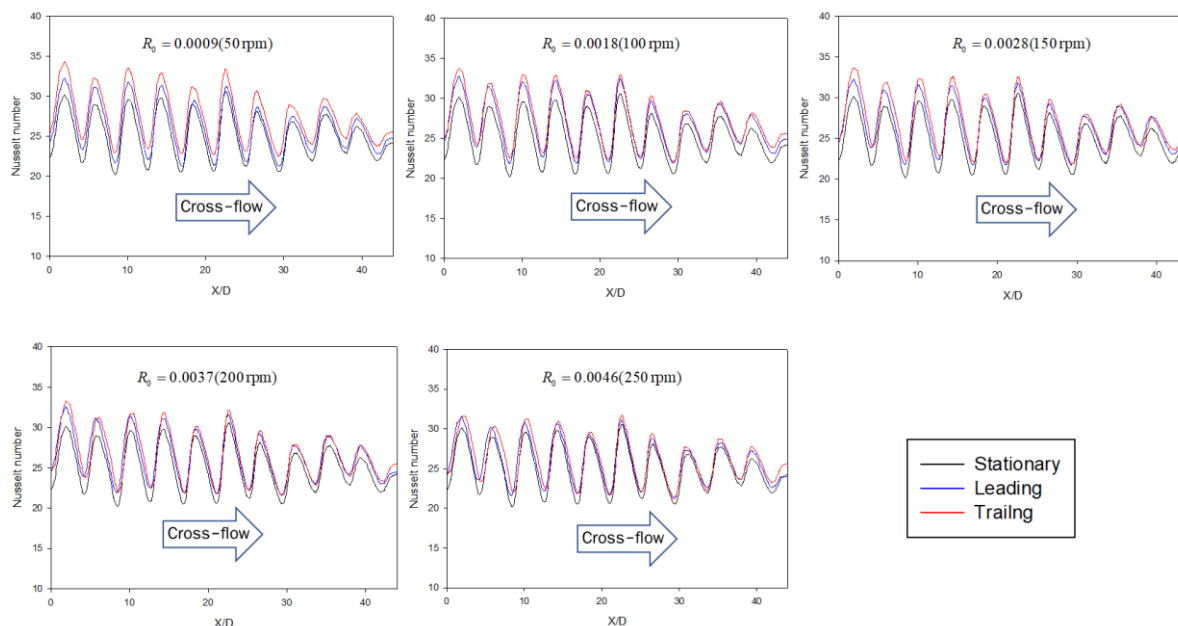
รูปที่ 4.8 ค่านัสเซลต์นับเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)



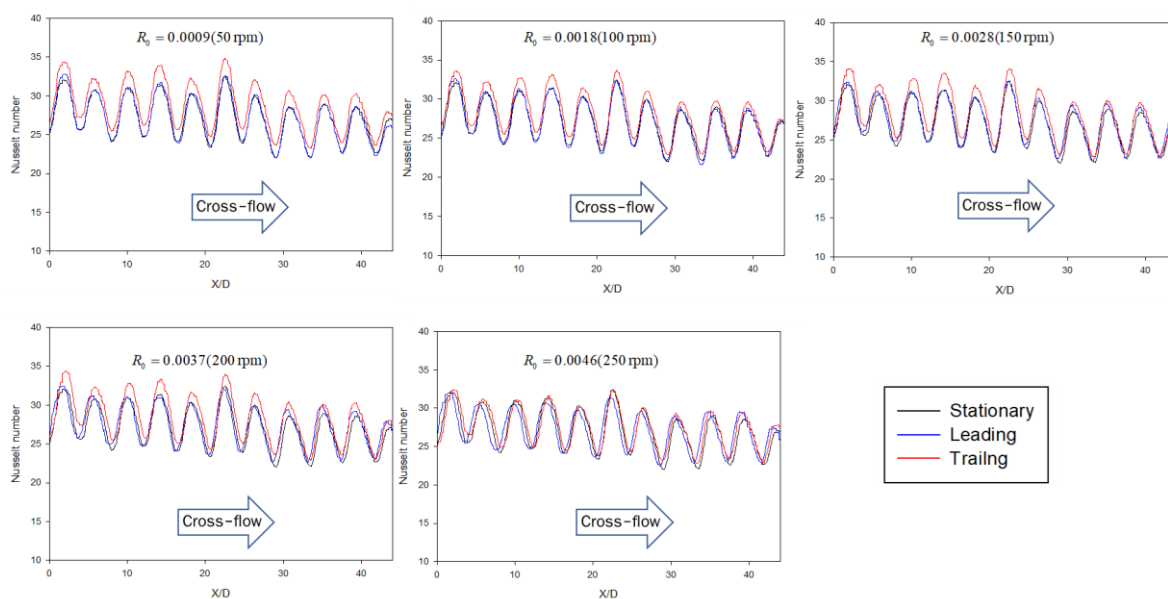
รูปที่ 4.9 ค่านัสเซลต์นับเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)

ในส่วนนี้ได้อธิบายเปรียบเทียบค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่างค่า Nusselt จำนวนเบอร์ของผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ในแต่ละค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 โดยในแต่ละรูปจะแสดงผลของรูปแบบทางออกกรณี Single radius inward exit ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ

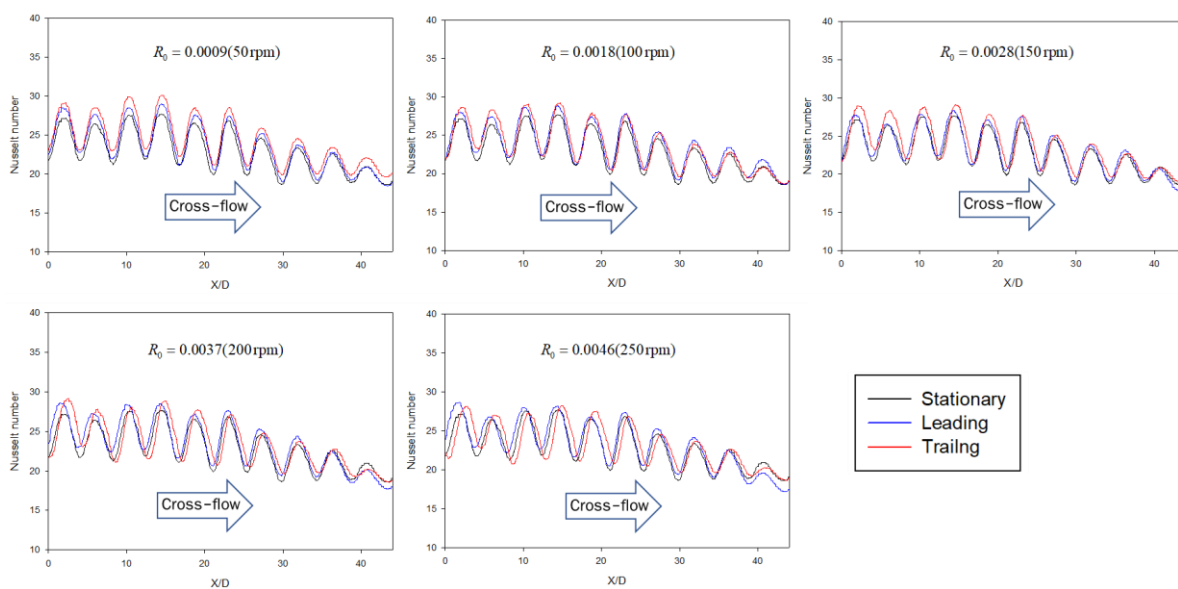
รูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยของผนังกรณีหยุดนิ่งเทียบกับผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มเหมือนกันทุกระยะพุ่งชน ซึ่งค่า Nusselt จำนวนเบอร์ของผนังด้าน Trailing จะสูงกว่าผนังด้าน Leading และผนังกรณีที่หยุดนิ่ง โดยที่ค่าตัวเลขการหมุนเท่ากับ 0.0009 จะมีค่า Nusselt จำนวนเบอร์สูงกว่ากรณีหยุดนิ่งมาก หลังจากนั้นค่า Nusselt จำนวนเบอร์จะค่อยๆ ลดลงสวนทางกับการเพิ่มขึ้นค่าตัวเลขการหมุน รูปแบบทางออก Single radius inward exit เป็นเพียงรูปแบบทางออกเดียวที่มีค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยของช่องการไหลที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ สูงกว่าค่า Nusselt จำนวนเบอร์ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ และ $6D$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน $H=2D$



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน $H=4D$



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน $H=6D$

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีรูปแบบทางออก Two-way exits

ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน ถูกแสดงในรูปของการกระจายของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์ ทำให้ทราบบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงและต่ำ บริเวณที่ถูกครอบงวนจากอิทธิพลของกระแสไหลตัด จากความเร็วรอบการหมุนที่เปลี่ยนไป ทิศทางของการหมุนที่ส่งผลกระทบต่อผนังพุ่งชน โดยผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยใช้รูปแบบทางออก Two-way exits ที่มีทางออกของช่องการไหล 2 ทางทั้งตำแหน่งไหลเข้าและออกจากแขนการหมุน โดยมีการเปลี่ยนระยะพุ่งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ โดยจะอธิบายในแต่ละค่าระยะพุ่งชน

(1) กรณีที่ระยะพุ่งชน $H=2D$

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลรูปแบบทางออก Two-way exits ที่ระยะพุ่งชนเท่ากับ $2D$ รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวด้านถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0$ จะเห็นได้ว่าค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากกว่ารูปแบบทางออกอื่น มีการครอบงวนจากกระแสไหลตัดน้อยกว่าเนื่องจากมีทางออกให้อากาศไหลออกได้มาก และค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์จะสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งเจ็ทบริเวณตรงกลางของช่องการไหล

เมื่อพิจารณาในกรณีที่หมุน ระยะพุ่งชน $H=2D$ นี้ยังมีการครอบงวนจากแรงหนีศูนย์กลางที่น้อยอยู่ ทิศทางของแรงโคริออริสที่กระทำกับกระแสไหลตัดมีทิศทางหักล้างกันทั้งสองฝั่งของช่องการไหลแต่แรงโคริออริสที่กระทำกับลำเจ็ทในด้าน Leading มีทิศทางเสริมกับแรงหนีศูนย์กลางต่างกับในด้าน Trailing ส่งผลให้กรณีผนังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Leading เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยที่ตัวเลขการหมุน R_o เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นไปตามตัวเลขการหมุนอีกด้วย หลังจากนั้นค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลงตามตามเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น และกรณีผนังด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Trailing เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงตัวเลขการหมุน $R_o=0.0037$ หลังจากนั้นค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลง

(2) กรณีที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$

รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0$ จะเห็นได้ว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอเนื่องจากมีพื้นที่ทางออกของช่องการไหลมากขึ้นทำให้อากาศในช่องไหลออกได้อย่างรวดเร็วและมีค่าใกล้เคียงกับที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ โดยบริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงที่สุดยังคงเป็นที่ตำแหน่งเจ็ทบริเวณตรงกลางของช่องการไหล

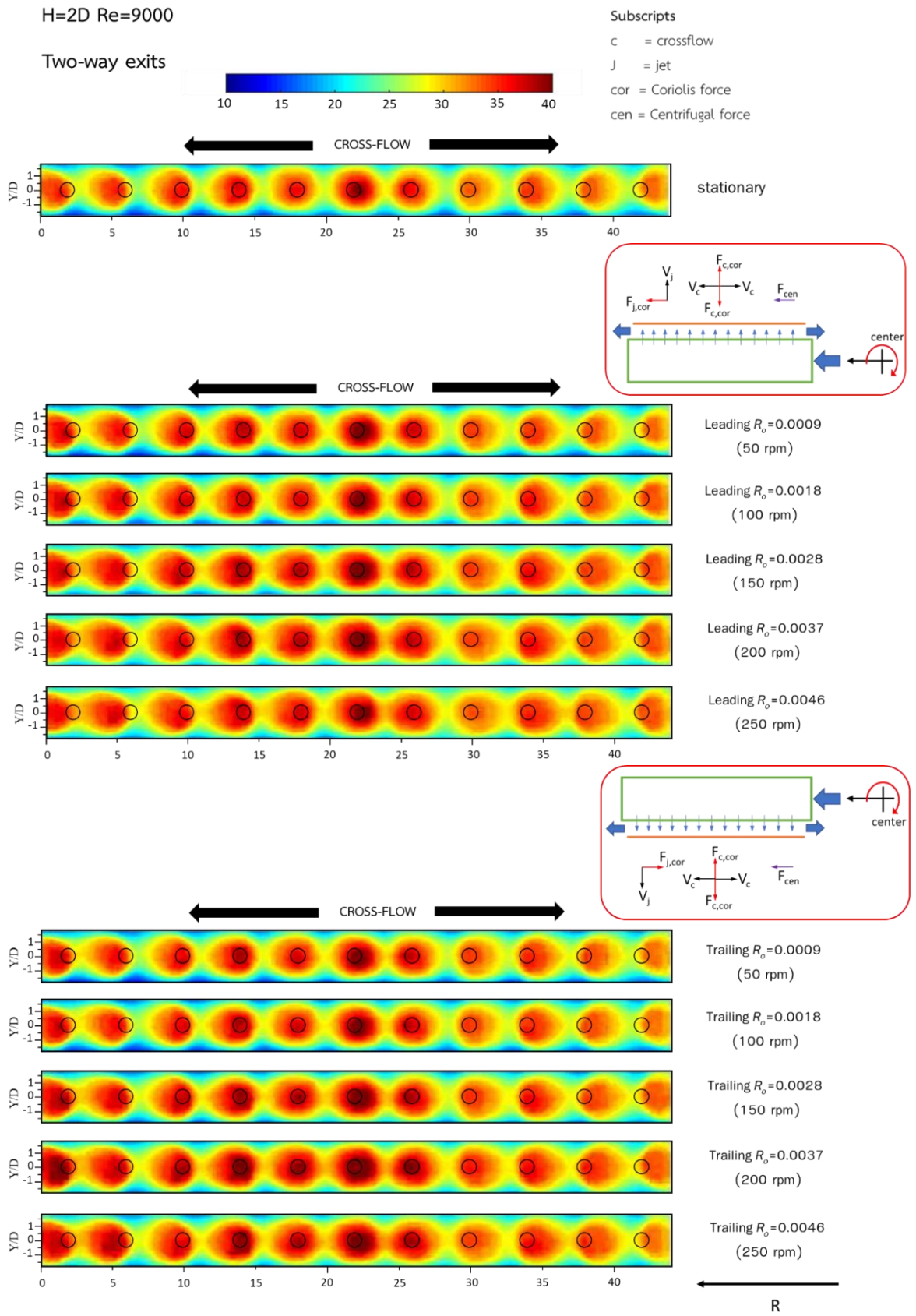
เมื่อพิจารณากรณีที่หมุนในระยะฟุ้งชนที่สูงขึ้นแรงหนีศูนย์กลางมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วรอบสูงมากกว่าที่ระยะฟุ้งชนต่ำ โดยในกรณีผนังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ตำแหน่งของลำเจ็ทที่ฟุ้งชนพื้นผิวแลกละเปลี่ยนความร้อนเลื่อนตำแหน่งออกไปทางปลายของแขนการหมุน โดยเมื่อตัวเลขการหมุนเพิ่มสูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะถูกรบกวนมากขึ้นไปด้วย อีกทั้งในช่วงบริเวณที่ใกล้กับปากทางออกด้านนอกของแขนการหมุนจะมีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ลดต่ำลงเรื่อยๆ และการหมุนด้าน Leading นี้มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำกว่าด้าน Trailing ที่ตัวเลขการหมุนเดียวกัน และกรณีผนังด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ตำแหน่งของลำเจ็ทที่ฟุ้งชนพื้นผิวแลกละเปลี่ยนความร้อนเลื่อนตำแหน่งออกไปทางปลายของแขนการหมุนแต่น้อยกว่าผนังด้าน Leading ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกด้านในของแขนการหมุนจะมีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นตามตัวเลขการหมุน กลับกันช่วงบริเวณใกล้กับปากทางออกด้านนอกของแขนการหมุนจะมีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ลดลง

(3) กรณีที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$

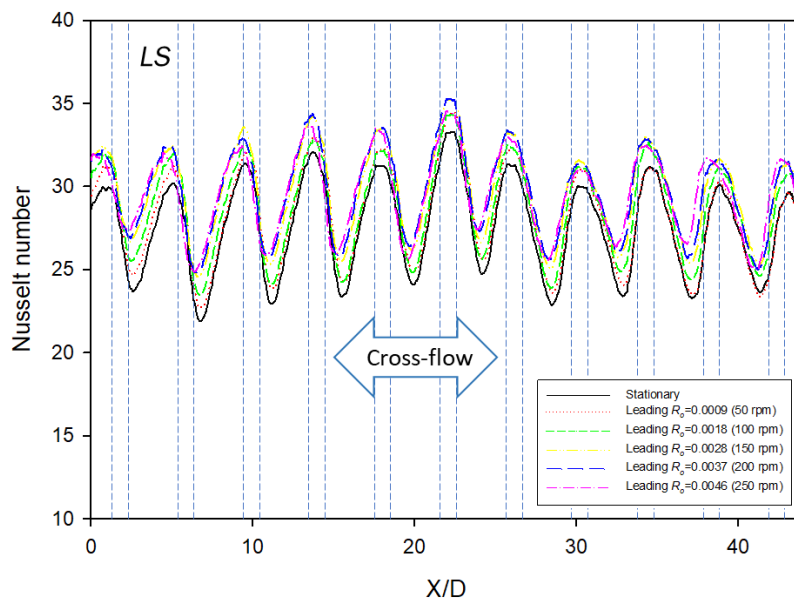
รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.20 และ รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0$ จะเห็นได้ว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวยังคงกระจายตัวได้สม่ำเสมอและมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทุกระยะฟุ้งชนเพราะความเร็วที่เจ็ทฟุ้งชนพื้นผิวแลกละเปลี่ยนความร้อนนั้นต่ำกว่าระยะฟุ้งชนอื่น โดยบริเวณที่มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงที่สุดยังคงเป็นที่ตำแหน่งเจ็ทบริเวณตรงกลางของช่องการไหลหลังจากนั้นจะมีค่าต่ำลงเล็กน้อยที่ตำแหน่งใกล้กับทางออกของช่องการไหล

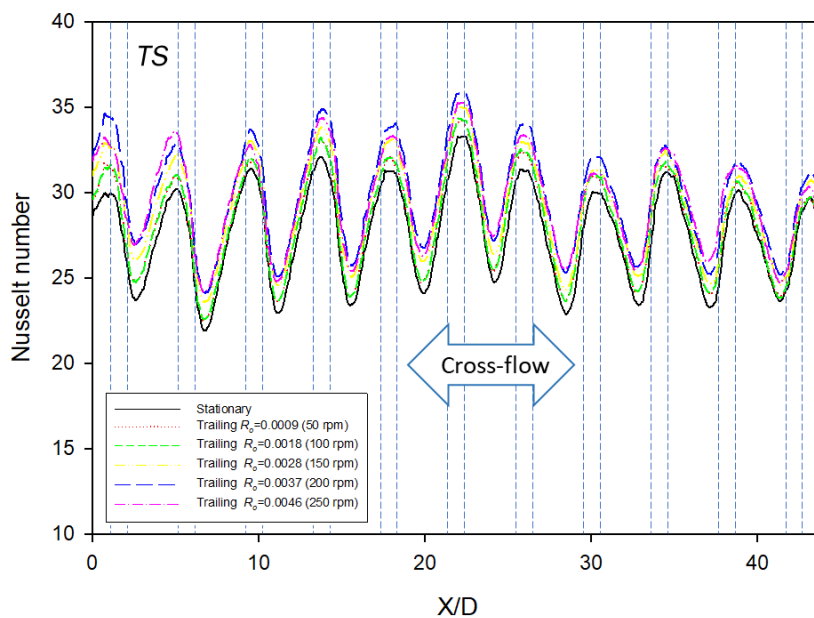
เมื่อพิจารณากรณีผนังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ตำแหน่งของลำเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเลื่อนตำแหน่งออกไปทางปลายของแขนการหมุนมากกว่าที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ โดยเมื่อตัวเลขการหมุนเพิ่มสูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะถูกรบกวนมากขึ้นไปด้วย ทำให้ที่ค่าตัวเลขการหมุนสูงสุดมีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยโดยรวมต่ำที่สุด และกรณีผนังด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ตำแหน่งของลำเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเลื่อนตำแหน่งออกไปทางปลายของแขนการหมุนมากกว่าที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ โดยเมื่อตัวเลขการหมุนเพิ่มสูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนจะถูกรบกวนมากขึ้นไปด้วย ทำให้ที่ค่าตัวเลขการหมุนสูงสุดมีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยโดยรวมต่ำที่สุดซึ่งใกล้เคียงกับผนังด้าน Leading ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing ที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ นี้มีความใกล้เคียงกัน ในส่วนของแรงภายในช่องการไหลมีแรงหนีศูนย์กลางที่มีขนาดเพิ่มสูงขึ้นตามค่าตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้นดูเหมือนว่าแรงหนีศูนย์กลางนี้จะส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงที่ความเร็วรอบการหมุนสูง



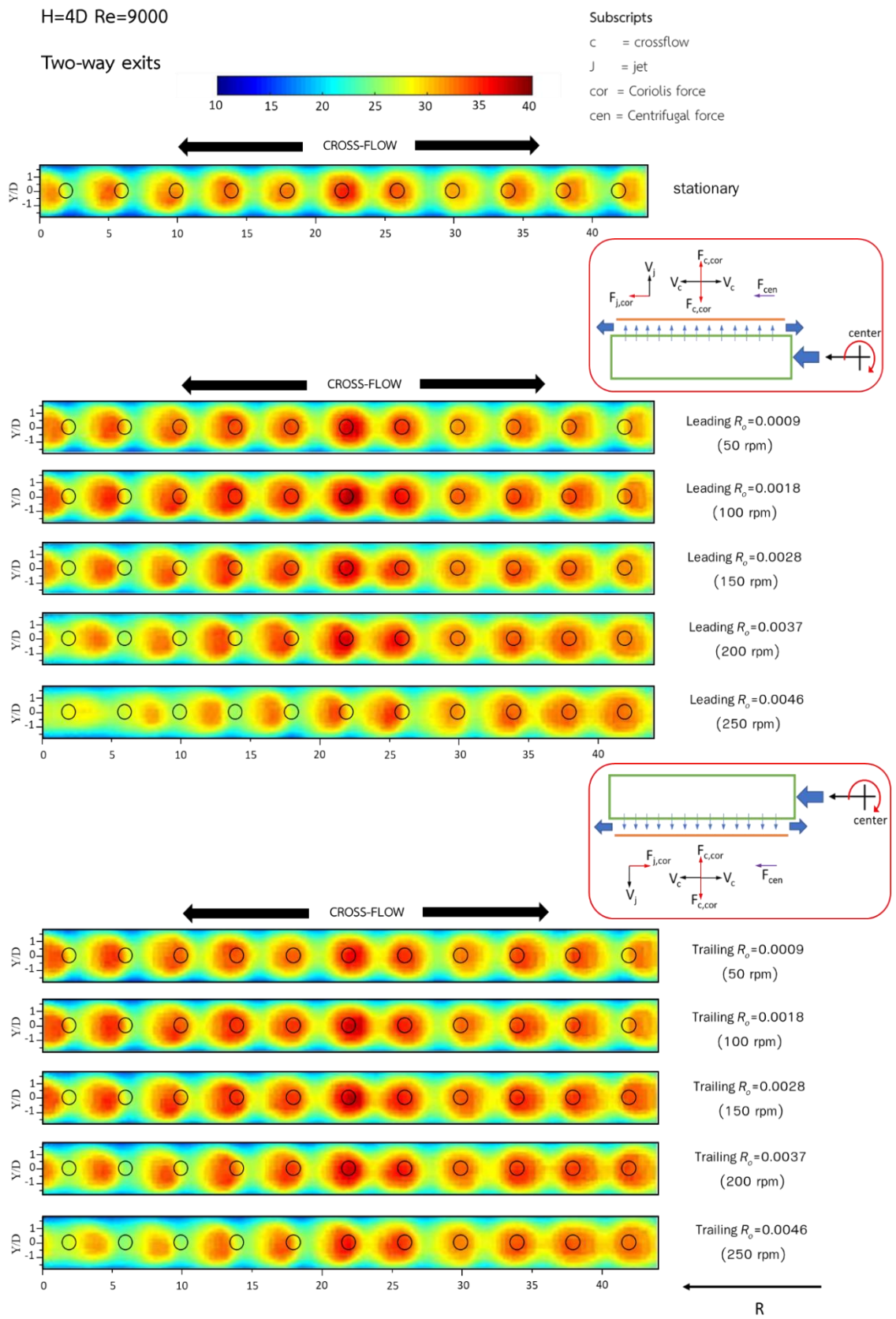
รูปที่ 4.13 การกระจายของค่าน้ำเชลต์น์ัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=2D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)



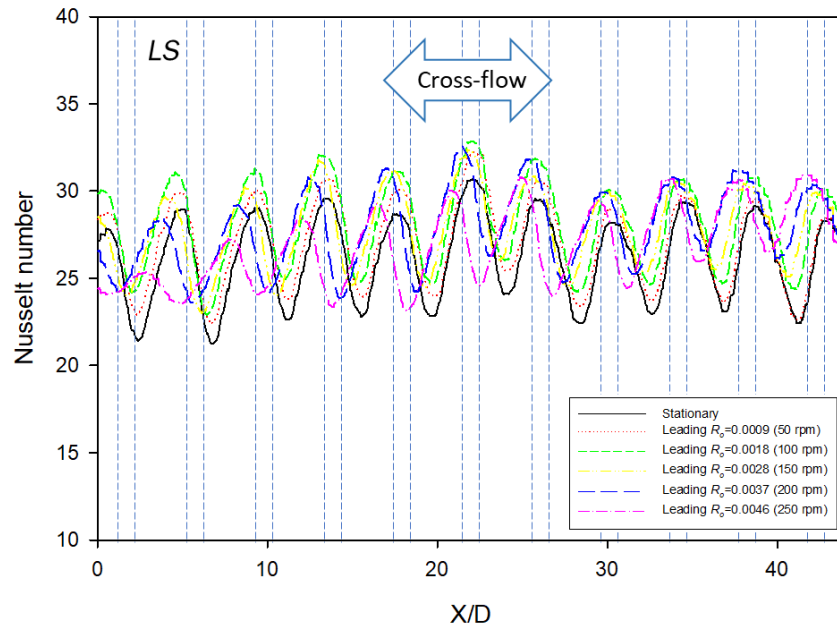
รูปที่ 4.14 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)



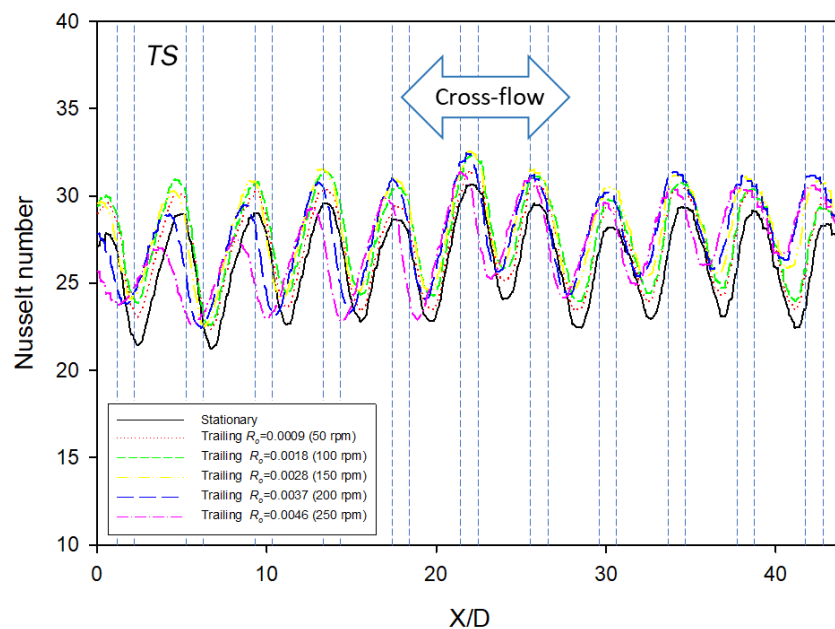
รูปที่ 4.15 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)



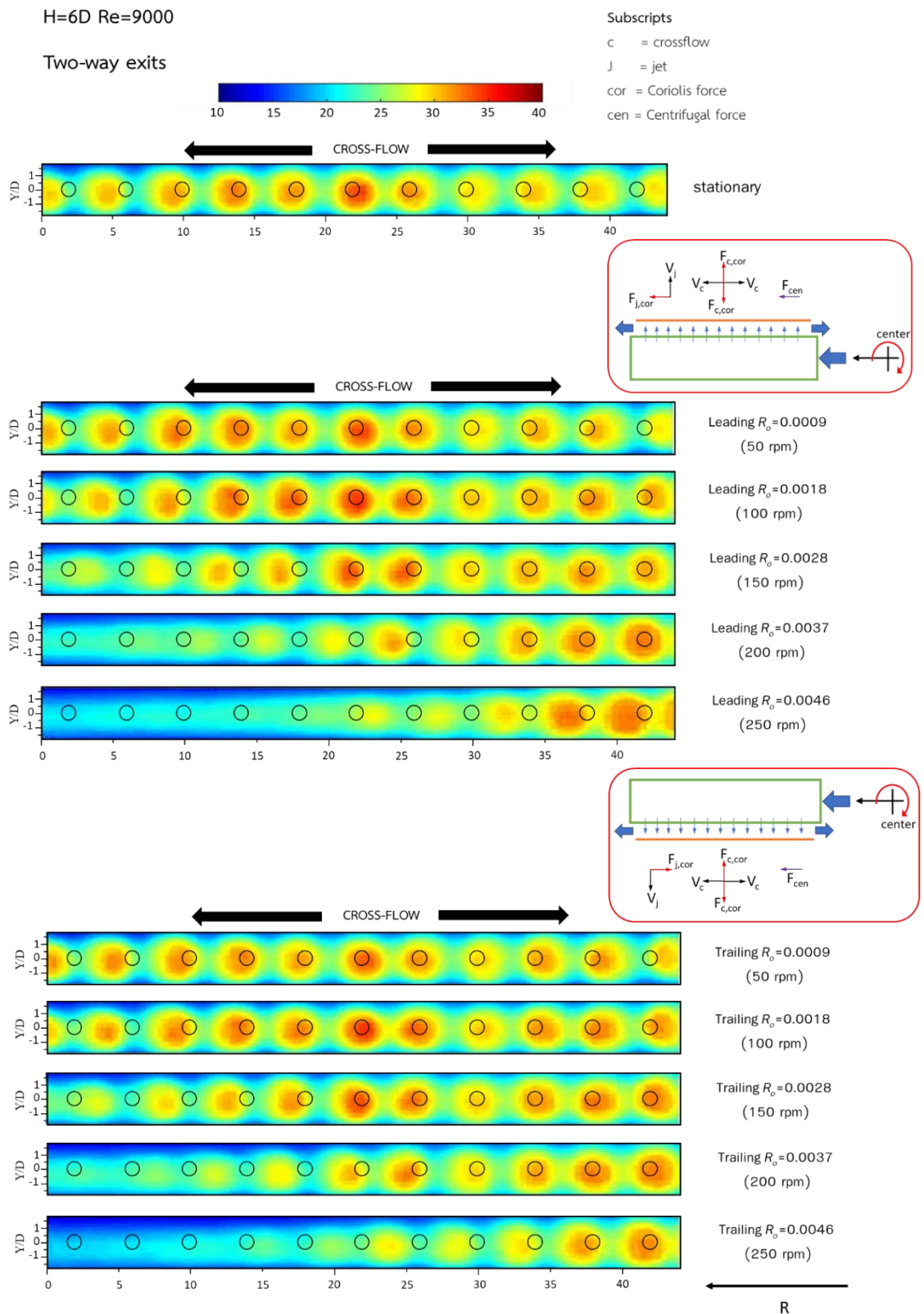
รูปที่ 4.16 การกระจายของค่าน้ำเชลต์น์มีเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=4D
 รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)



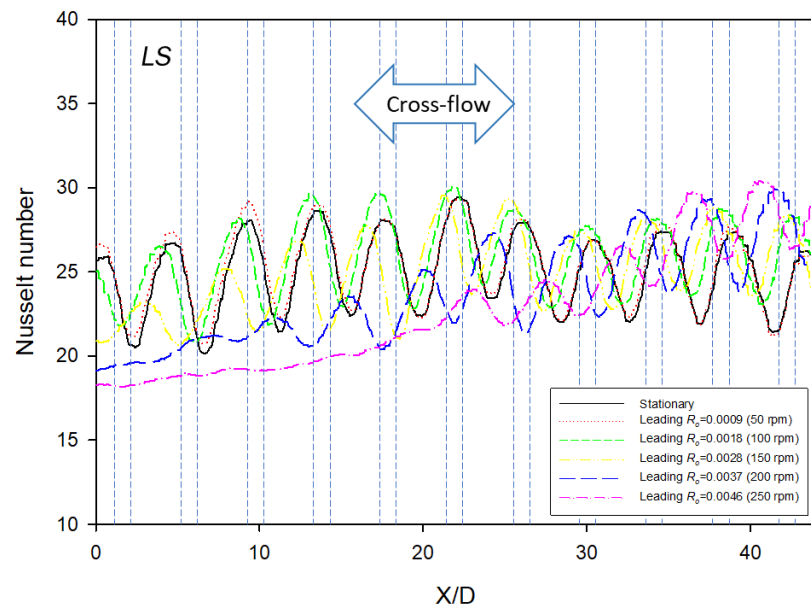
รูปที่ 4.17 คำนวณเสียดทานเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)



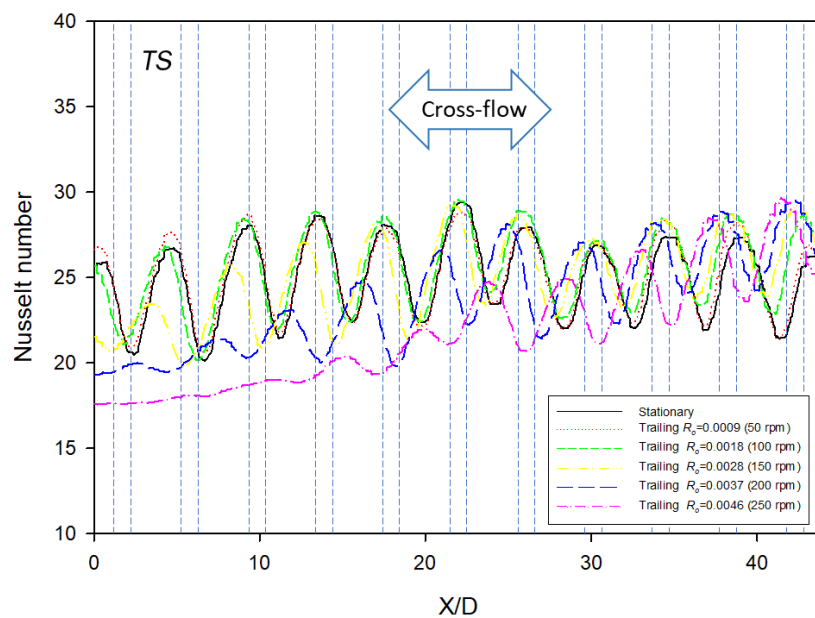
รูปที่ 4.18 คำนวณเสียดทานเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)



รูปที่ 4.19 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=6D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)



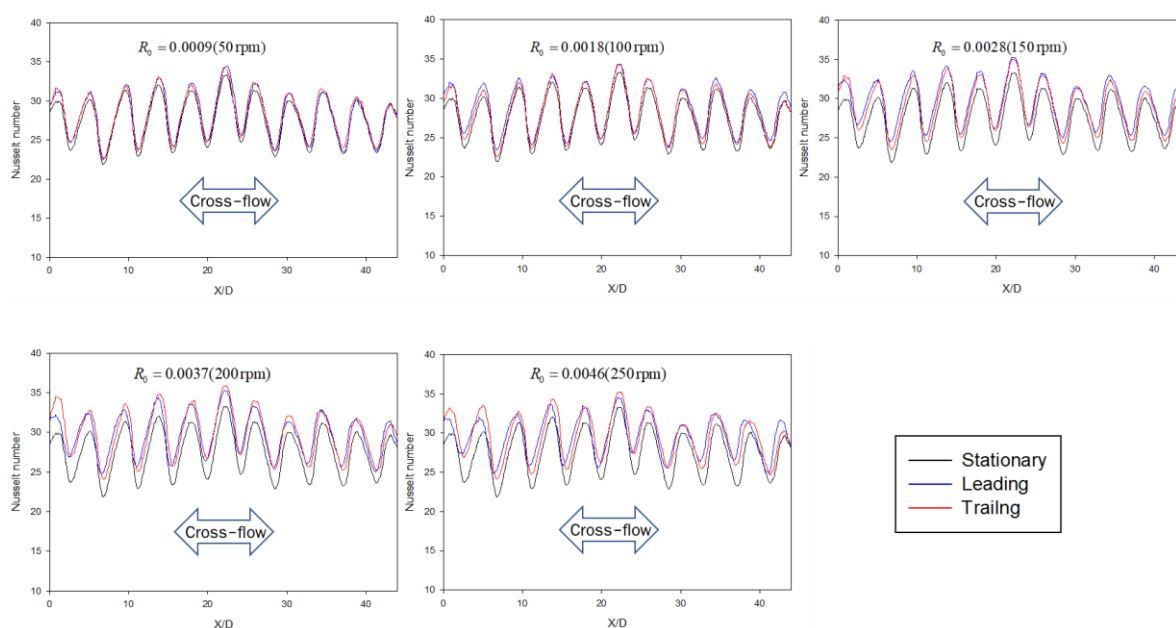
รูปที่ 4.20 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)



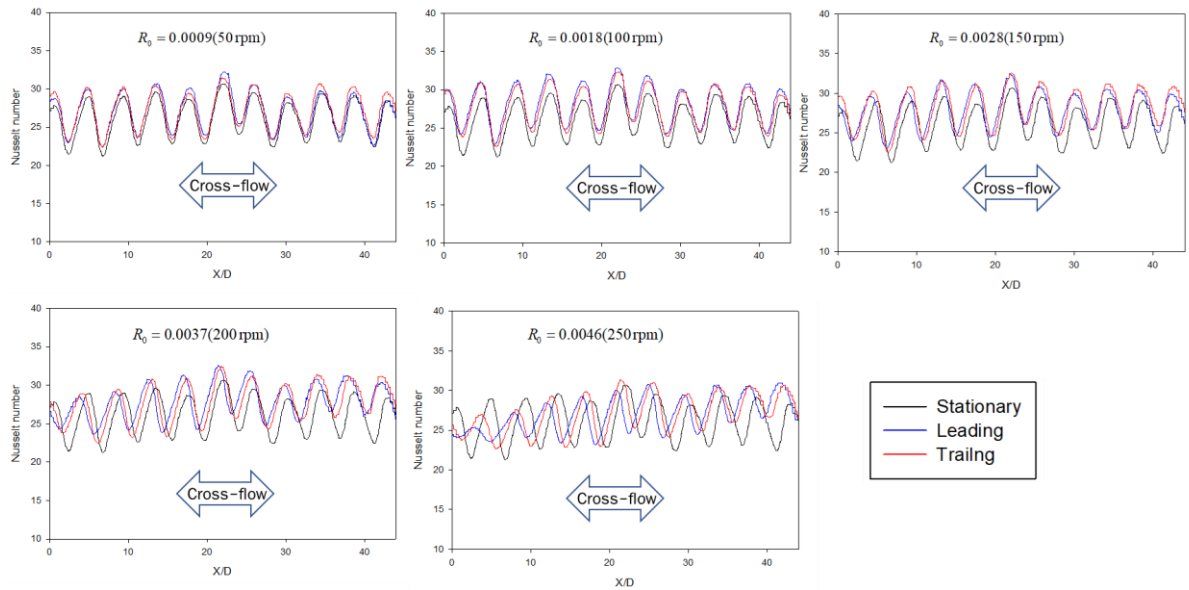
รูปที่ 4.21 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 9,000$)

ในส่วนนี้ได้อธิบายเปรียบเทียบค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่างค่า Nusselt จำนวนเบอร์ของผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ในแต่ละค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 โดยในแต่ละรูปจะแสดงผลของรูปแบบทางออกกรณี Two-way exits ที่ระยะพุ่งชน H= 2D, 4D และ 6D ตามลำดับ

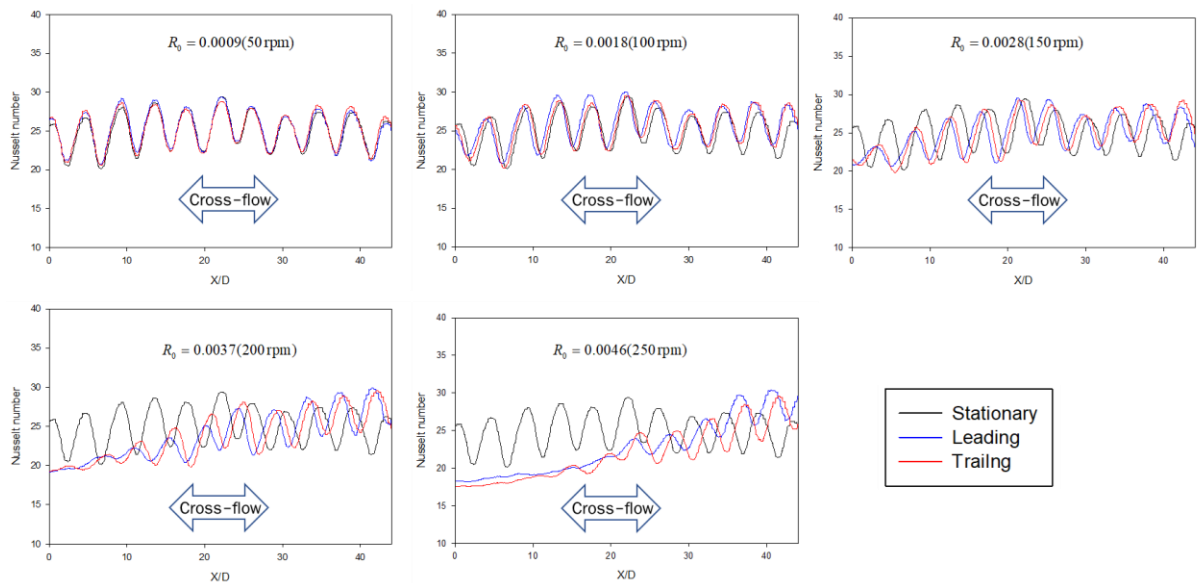
รูปที่ 4.22 ถึง รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน H=2D, 4D และ 6D ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยของผนังกรณีหยุดนิ่งเทียบกับผนังด้าน Leading และ Trailing ที่ระยะพุ่งชน H=2D ค่า Nusselt จำนวนเบอร์ของผนังด้าน Leading และ Trailing มีความสม่ำเสมอของค่า Nusselt จำนวนเบอร์ตลอดพื้นผิวในช่องการไหล และมีค่าสูงกว่ากรณีหยุดนิ่ง แต่ที่ระยะพุ่งชนสูงขึ้นเมื่อค่าตัวเลขการหมุนเพิ่มขึ้นปรากฏว่าการหมุนรบกวนการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลรูปแบบ Two-way exits และที่ระยะพุ่งชน H=6D เมื่อค่าตัวเลขการหมุนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Nusselt จำนวนเบอร์ต่ำกว่าในกรณีหยุดนิ่ง ค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยของรูปแบบช่องการไหลนี้มีค่าลดลงตามระยะพุ่งชนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nusselt จำนวนเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน H=2D



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=4D$



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=6D$

4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวกรณีรูปแบบทางออก Single radius outward exit

ผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน ถูกแสดงในรูปของการกระจายของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์ ทำให้ทราบบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงและต่ำ บริเวณที่ถูกครอบงำจากอิทธิพลของกระแสไหลตัด จากความเร็วรอบการหมุนที่เปลี่ยนไป ทิศทางของการหมุนที่ส่งผลต่อผนังพุ่งชน โดยผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายใต้เงื่อนไขใช้รูปแบบทางออก Single radius outward exit ที่มีทางออกของช่องการไหล 1 ทาง ที่ตำแหน่งไหลออกจากแนวการหมุน โดยมีการเปลี่ยนระยะพุ่งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ โดยจะอธิบายในแต่ละค่าระยะพุ่งชน

(1) กรณีระยะพุ่งชน $H=2D$

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลรูปแบบทางออก Single radius outward exit ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.26 และ รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0$ จะเห็นได้ว่าค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะค่าสูงที่บริเวณตำแหน่งใกล้กับแนวการหมุนและจะค่อยๆมีค่าลดลงเมื่อถึงตำแหน่งใกล้กับทางออกของช่องการไหล เนื่องจากอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีทางออกทางเดียวส่งผลให้การกระจายตัวของค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์ไม่สม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการหมุนรูปแบบทางออกของช่องการไหลรูปแบบนี้มีแรงหนีศูนย์กลางที่มีทิศทางเดียวกับกระแสไหลตัดภายในช่องการไหล แรงโคริออริสที่กระทำกับกระแสไหลตัดมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของเจ็ทที่ผนังด้าน Trailing แต่มีทิศทางตรงกันข้ามกับผนังด้าน Leading ส่งผลให้กรณีผนังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Leading เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยที่ตัวเลขการหมุน R_o เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นไปตามตัวเลขการหมุนอีกด้วย และกรณีผนังด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Trailing เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงตัวเลขการหมุน $R_o=0.0037$ หลังจากนั้นค่าตัวเลขเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลง

(2) กรณีระยะฟุ้งชน $H=4D$

รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.29 และ รูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0$ จะเห็นได้ว่าค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะค่าสูงที่บริเวณตำแหน่งใกล้กับแขนการหมุนและจะค่อยๆมีค่าลดลงเมื่อถึงตำแหน่งใกล้กับทางออก เนื่องจากอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีทางออกทางเดียวส่งผลให้การกระจายตัวของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์ไม่สม่ำเสมอ และค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยลดลงเมื่อเทียบกับระยะฟุ้งชน $H=2D$

กรณีผนังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Leading เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยที่ตัวเลขการหมุน R_o เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นไปตามตัวเลขการหมุนอีกด้วย และกรณีผนังด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Trailing เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดที่ตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ หลังจากนั้นค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยลดลงตามตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น

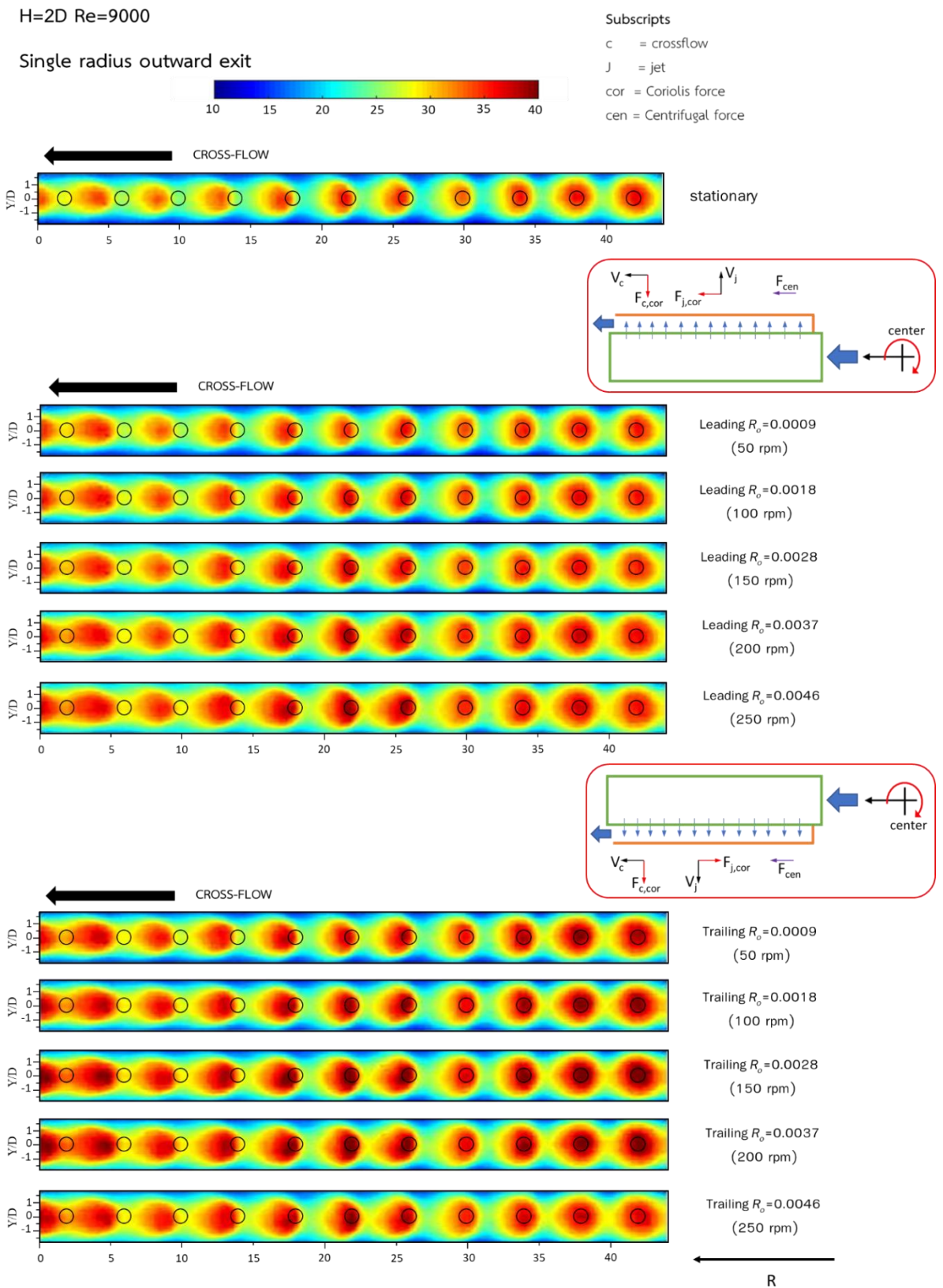
(3) กรณีระยะฟุ้งชน $H=6D$

รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบกระจายของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนบนผนังด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ รูปแบบทางออก Single radius inside exit ($Re = 9,000$) ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายร่วมกับ รูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบผนังด้าน Leading และ Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง

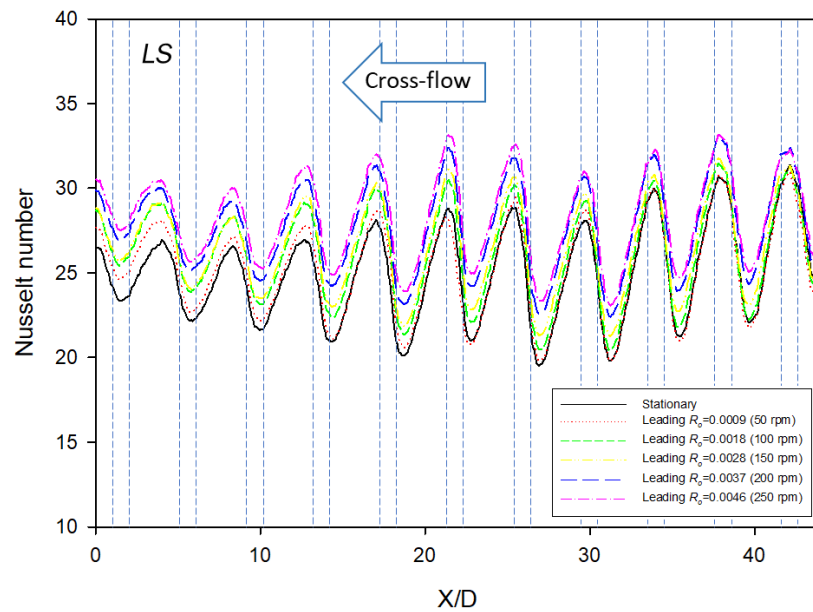
โดยผลของกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0$ จะเห็นได้ว่าค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวจะค่าสูงที่บริเวณตำแหน่งใกล้กับแขนการหมุนและจะค่อยๆมีค่าลดลงเมื่อถึงตำแหน่งใกล้กับทางออก เนื่องจากอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีทางออกทางเดียวส่งผลให้การกระจายตัวของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์ไม่สม่ำเสมอ โดยค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยจะต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทุกระยะฟุ้งชน

เมื่อพิจารณาแรงโคริออริสที่กระทำกับลำเจ็ทมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางแรงหนีศูนย์กลางที่ผนังด้าน Trailing แต่มีทิศทางเสริมกับแรงหนีศูนย์กลางในผนังด้าน Leading โดยผนังด้าน Leading พบว่าการหมุนทำให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผนังด้าน Leading เพิ่มขึ้นเมื่อ

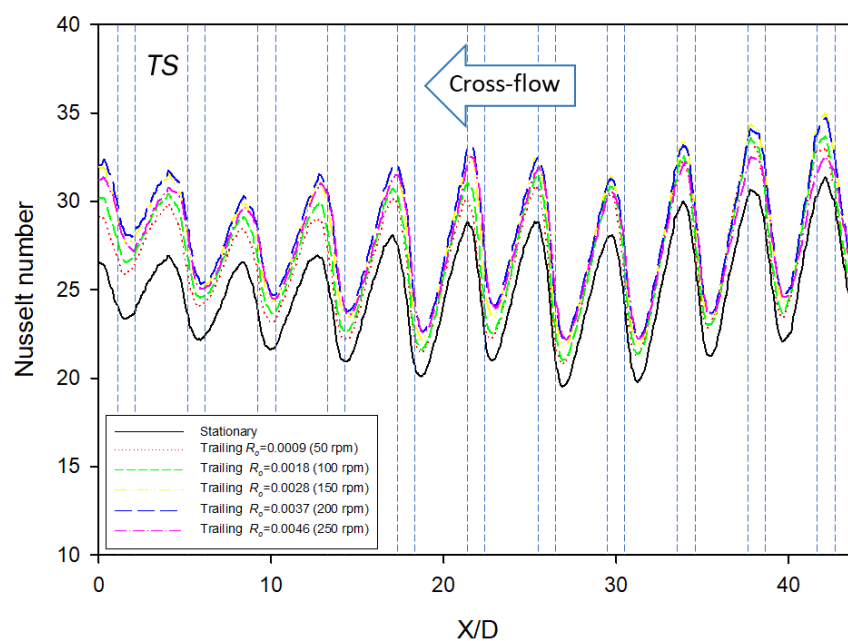
เทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยที่ตัวเลขการหมุน R_0 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นไปตามตัวเลขการหมุนอีกด้วย และกรณีหนึ่งด้าน Trailing พบว่าการหมุนทำให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งในทุกความเร็วรอบ โดยที่ตัวเลขการหมุน R_0 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นไปตามตัวเลขการหมุนอีกด้วย



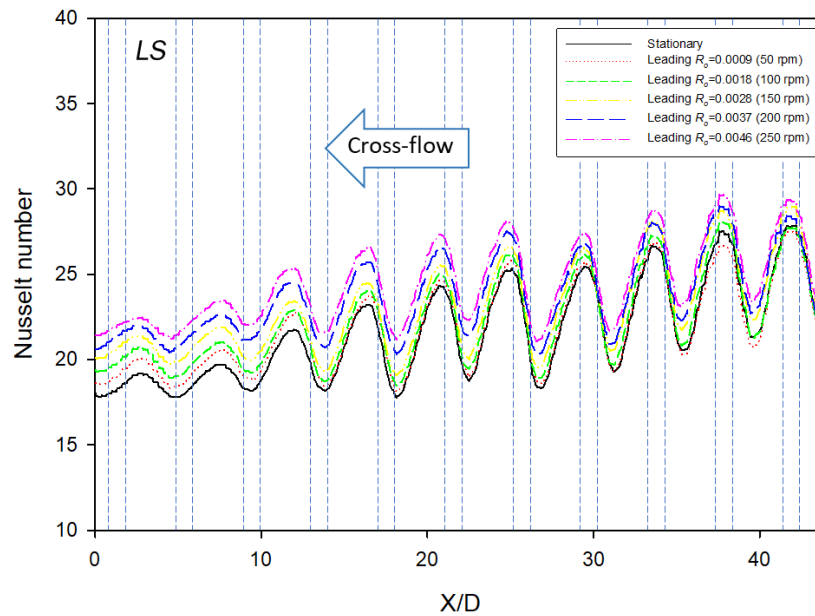
รูปที่ 4.25 การกระจายของค่าน้ำสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 9,000)



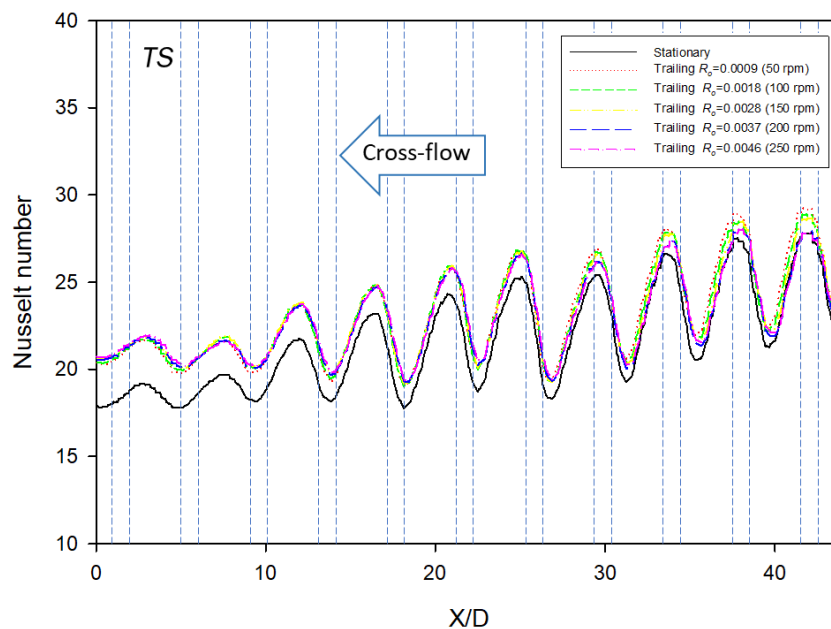
รูปที่ 4.26 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)



รูปที่ 4.27 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)



รูปที่ 4.29 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟังก์ชัน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)



รูปที่ 4.30 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟังก์ชัน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)

H=6D Re=9000

Single radius outward exit

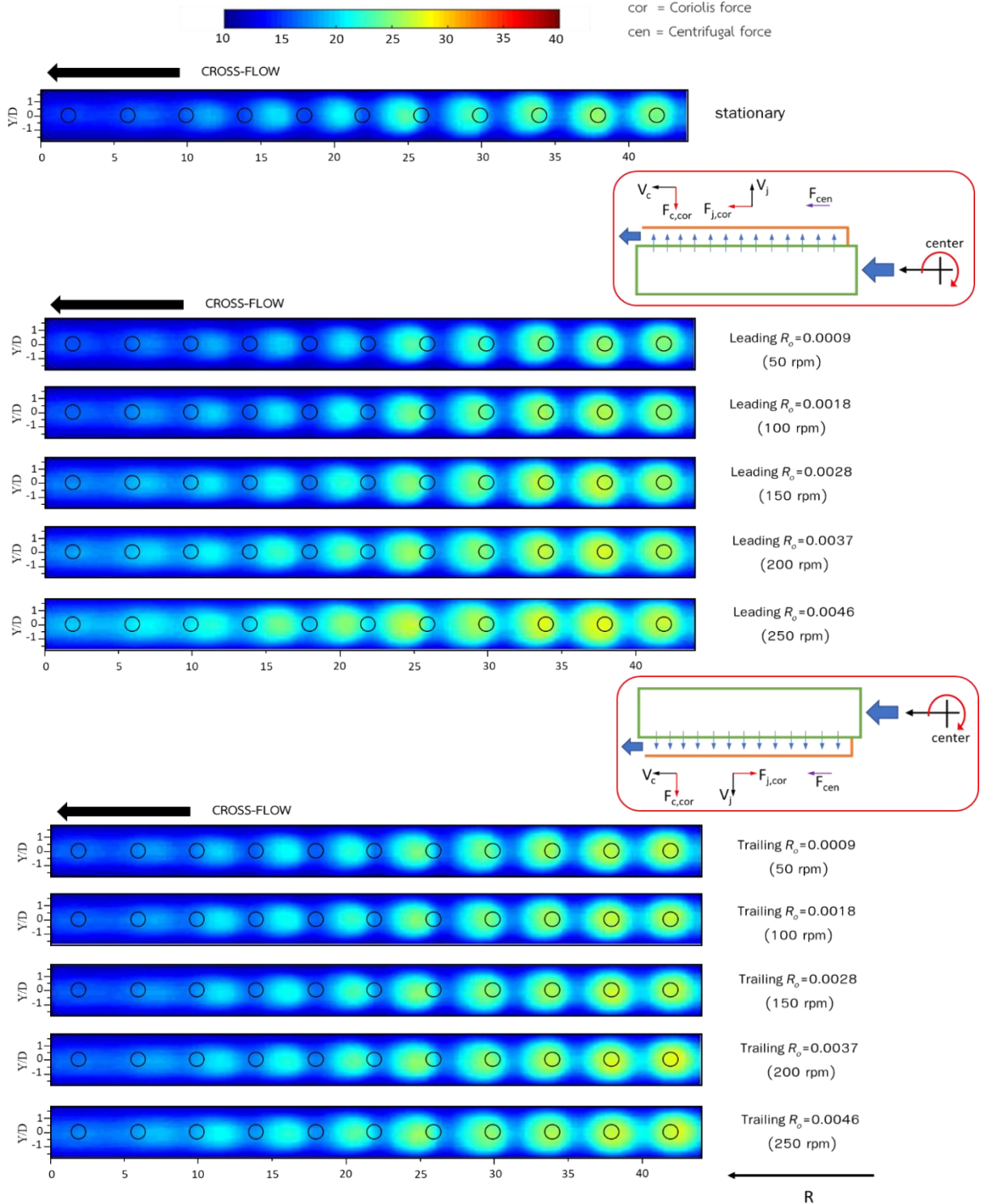
Subscripts

c = crossflow

J = jet

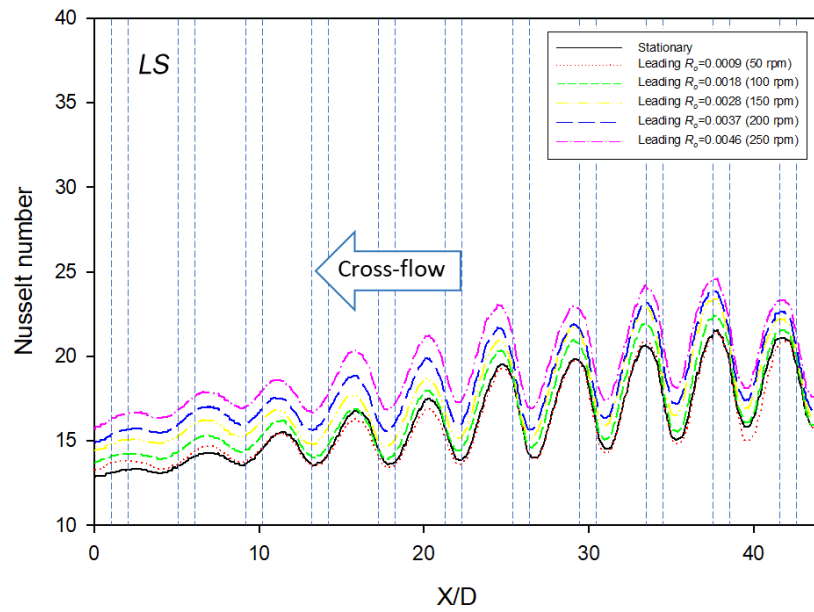
cor = Coriolis force

cen = Centrifugal force

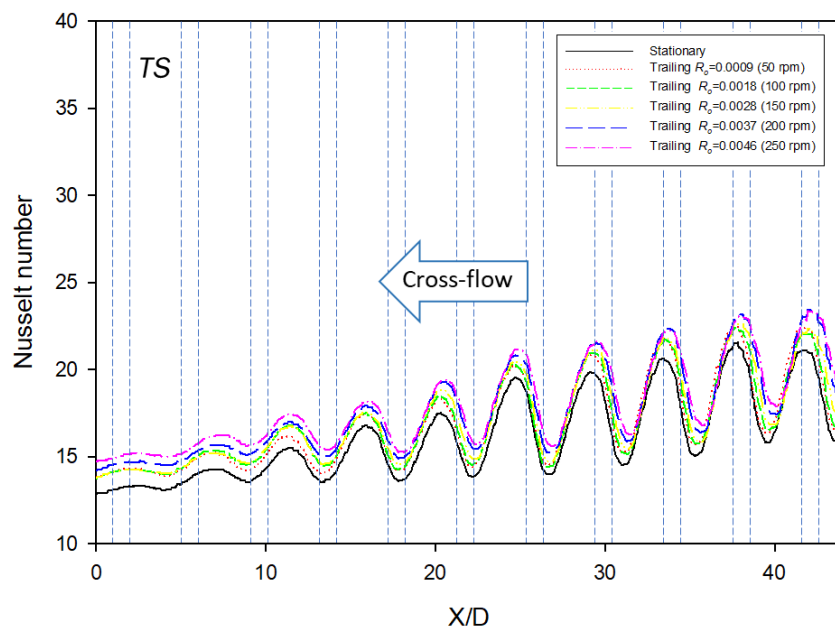


รูปที่ 4.31 การกระจายของค่าน้ำเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=6D

รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 9,000)



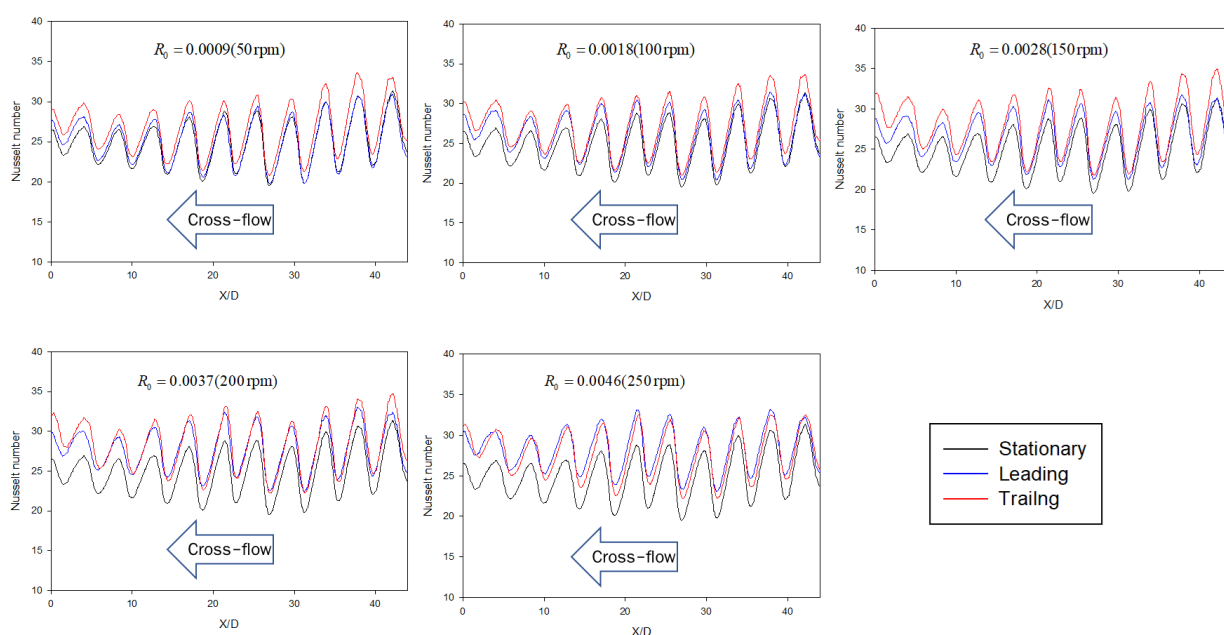
รูปที่ 4.32 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)



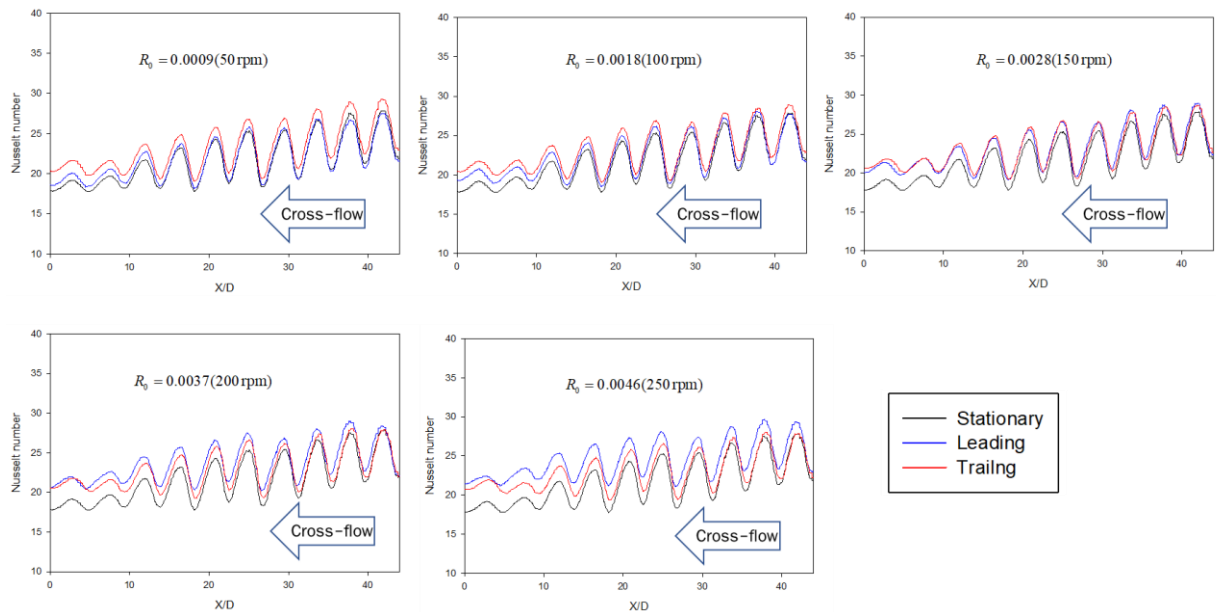
รูปที่ 4.33 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะ ฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)

ในส่วนนี้ได้อธิบายเปรียบเทียบค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์ของผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ในแต่ละค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 โดยในแต่ละรูปจะแสดงผลของรูปแบบทางออกกรณี Single radius outward exit ที่ระยะพุ่งชน H=2D, 4D และ 6D ตามลำดับ

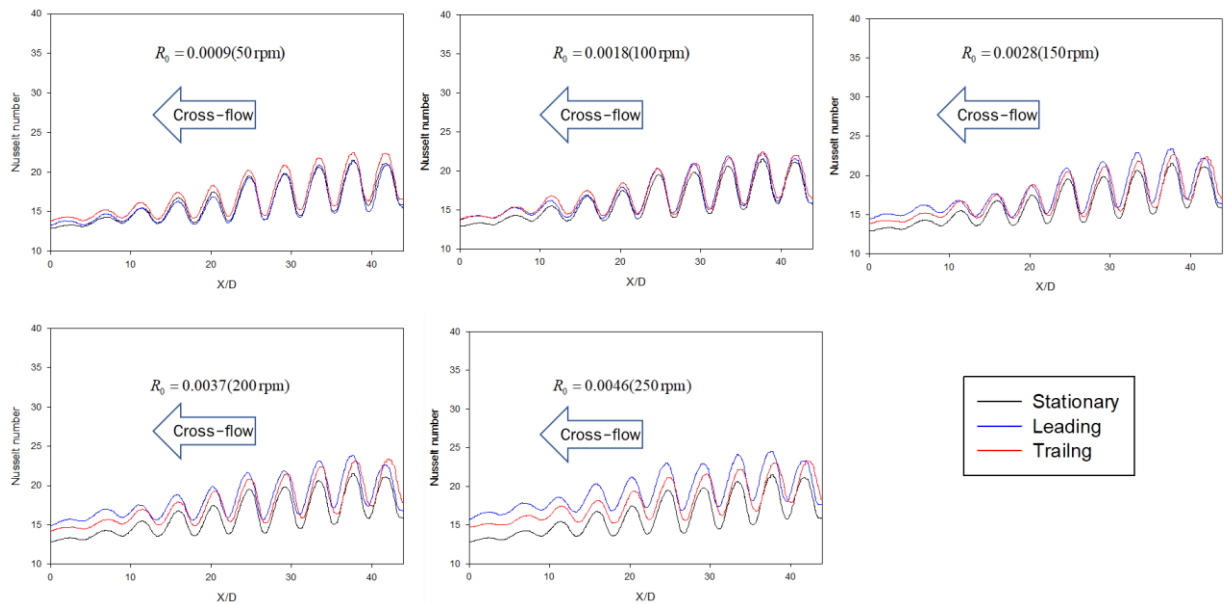
รูปที่ 4.34 ถึง รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน H=2D, 4D และ 6D ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์เฉลี่ยของผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง เพิ่มขึ้นสูงตามค่าตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะพุ่งชน H=2D ค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์เฉลี่ยของผนังด้าน Trailing สูงกว่าผนังด้าน Leading แต่ที่ระยะพุ่งชน H=4D และ 6D ค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์เฉลี่ยของผนังด้าน Leading จะสูงกว่าผนังด้าน Trailing ค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์เฉลี่ยของช่องทางไหลรูปแบบทางออก Single radius outward exit ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะพุ่งชน



รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเฉลี่ยนัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะพุ่งชน H=2D



รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=4D$



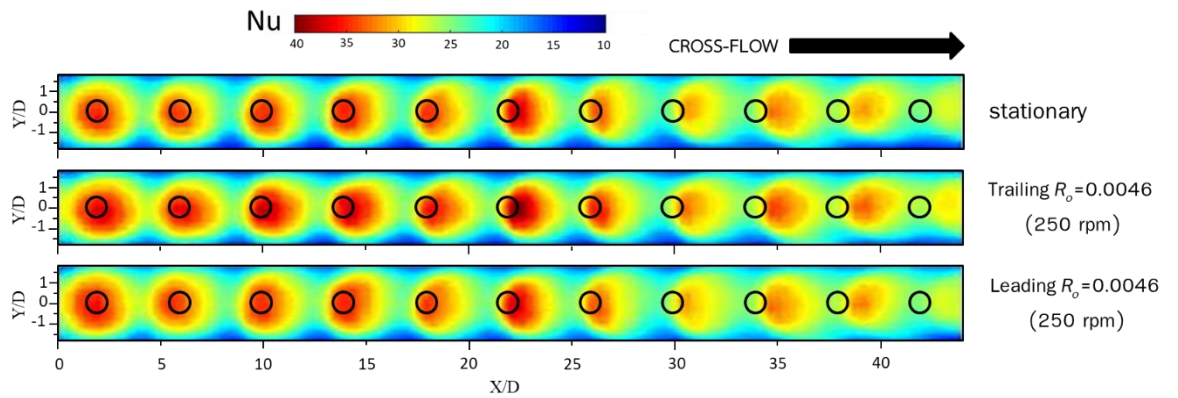
รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ระยะฟุ้งชน $H=6D$

4.2 ผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน

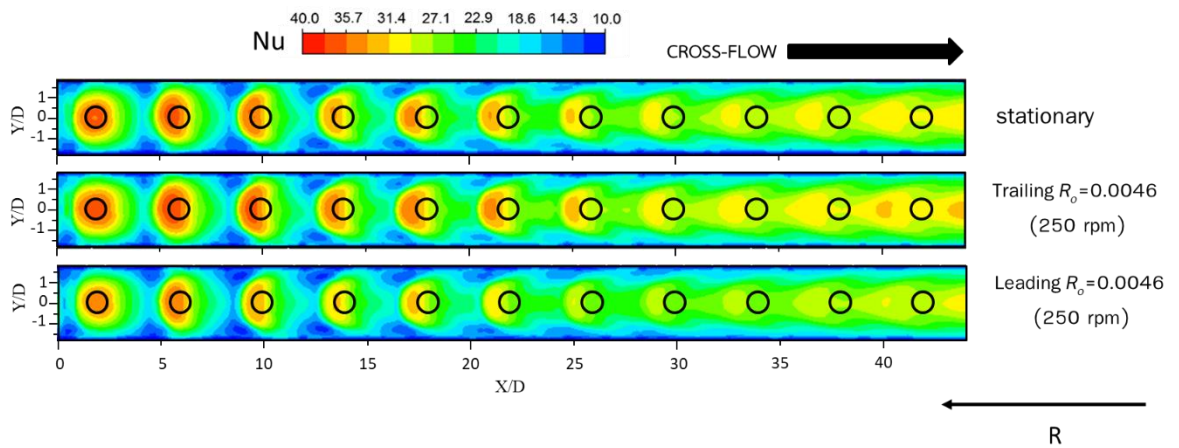
ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุนได้ทำการศึกษาด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลพฤติกรรมกรไหลร่วมอธิบายประกอบกับผลการศึกษากายถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองในส่วนแรก โดยผลการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนเปรียบภายใต้เงื่อนไข ความเร็วรอบที่ 250 rpm มีทิศทางกรหมุนที่ต่างกันเพื่อเกิดเป็นผนังด้าน Leading และ Trailing เปรียบเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ 9,000 ระยะพุ่งชน $H=2D$ และ $6D$ เพื่อสังเกตพฤติกรรมกรไหลของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน โดยผลการจำลองแบ่งตามรูปแบบทางออกของช่องการไหล 3 รูปแบบ คือ Single radius inward exit, Two-way exits และ Single radius outward exit เช่นเดียวกับการทดลองในส่วนแรก

4.2.1 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวระหว่างกรทดลองกับการจำลองกรไหล

ตัวอย่างแสดงการเปรียบเทียบการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวระหว่างกรทดลองกับการจำลองกรไหลในรูปที่ 4.37 โดย รูปที่ 4.37 (ก) แสดงการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ได้จากการทดลองและรูปที่ 4.37 (ข) แสดงการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ได้จากการไหลโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ในกรณีที่น่ามาทำการเปรียบเทียบนี้เป็นรูปแบบทางออกของช่องการไหลแบบ Single radius inward exit ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ 9,000 ทำการเปรียบเทียบที่ค่าตัวเลขกรหมุน $R_o=0$ และ 0.0046 (คำนวณจากความเร็วยรอบกรหมุนเท่ากับ 250 rpm ซึ่งเป็นความเร็วยรอบกรหมุนสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง) ทั้งผนังด้าน Leading และ Trailing โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Realizable $k-\epsilon$ ร่วมกับ Enhanced wall treatment กำหนดอุณหภูมิของอากาศเข้าที่ 27 °C เท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง จากการเปรียบเทียบการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวระหว่างกรทดลองกับการจำลองกรไหลมีลักษณะการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันเพียงแต่กระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ได้จากการจำลองกรไหลมีค่าต่ำกว่ากรทดลองเล็กน้อยเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านความแม่นยำในการทำนายกรไหลใกล้พื้นผิวถ่ายเทความร้อน



(ก) การทดลอง



(ข) การจำลองการไหล

รูปที่ 4.37 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวระหว่าง การทดลองกับการจำลองการไหล ที่ระยพุงชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius inward exit

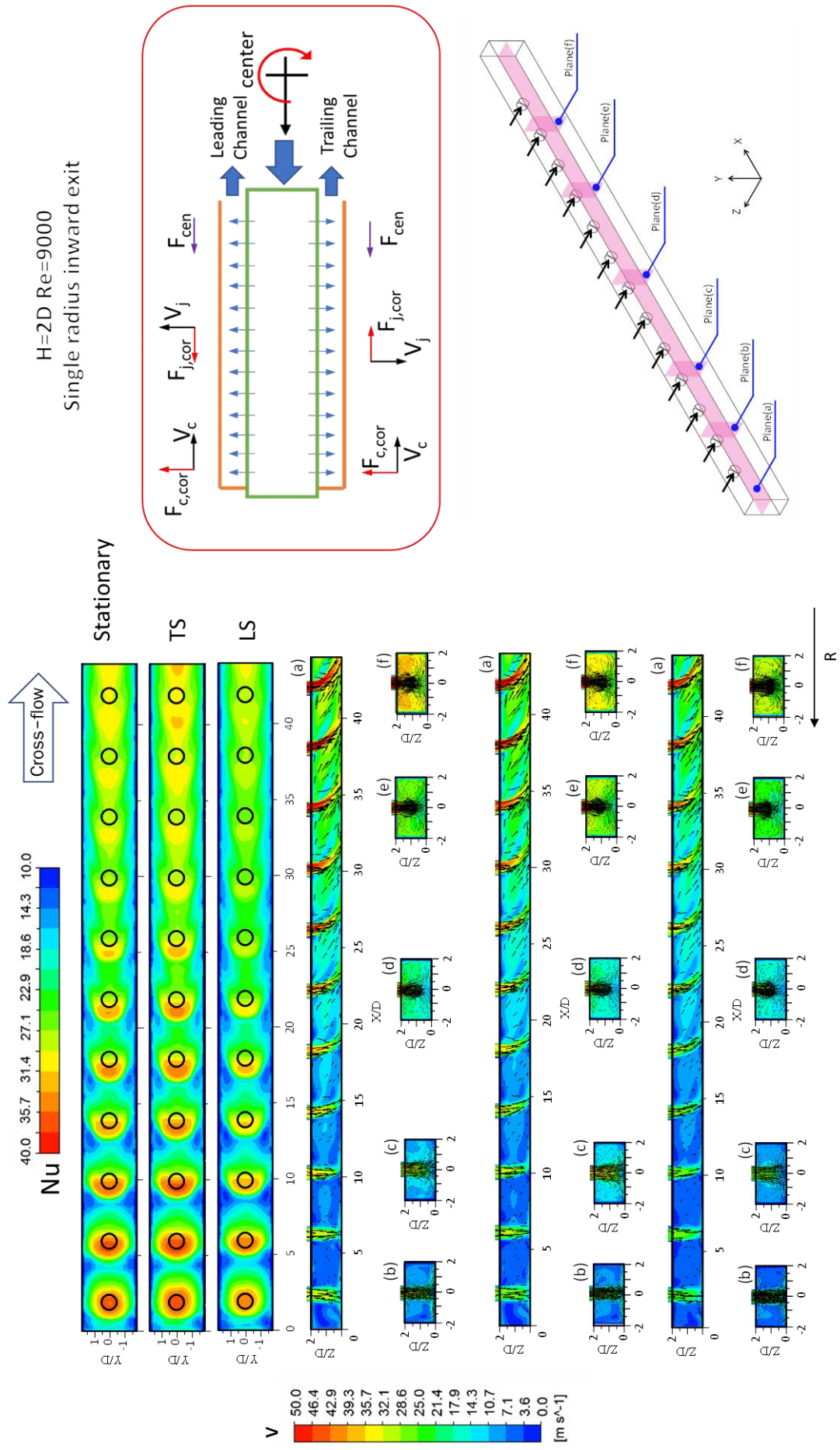
4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะการไหลกรณีรูปแบบทางออก Single radius inward exit

รูปที่ 4.38 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re=9,000$) โดยรูปแสดงแรงที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลอีกทั้งยังมีการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วในแต่ละระนาบแสดงดังรูป สำหรับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ระนาบ (a) เวกเตอร์ความเร็วค่อยๆเบนตัวและทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิว จากการกระจายความเร็วสังเกตได้ว่าที่บริเวณก่อนกระแสไหล (Upstream) ความเร็วที่ออกจากปากทางออกเจ็ทมีต่ำกว่าบริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ที่ระนาบ (d), (e) และ (f) เวกเตอร์ความเร็วมีการหมุนวนภายในช่องการไหลต่างกับที่ระนาบ (b) และ (c) ที่เวกเตอร์ความเร็วพุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่าส่งผลให้มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงกว่า

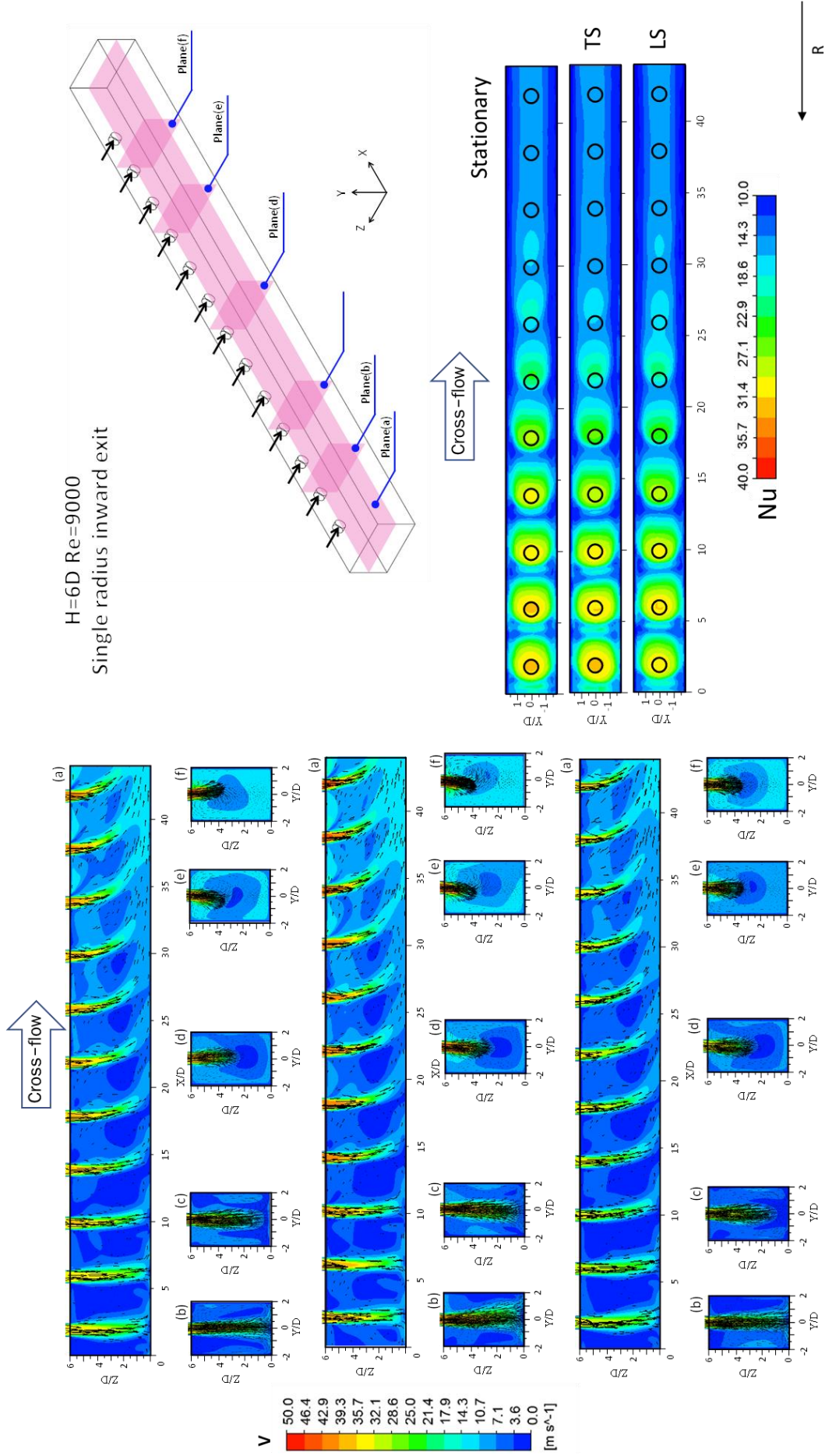
กรณีค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0046$ ระยะพุ่งชน $H=2D$ การกระจายความเร็วที่ระนาบ (a) ของผนังด้าน Leading และ Trailing มีการกระจายความเร็วที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ทช่วงหลังกระแสไหล (Downstream) มีค่าสูงกว่าช่วงก่อนกระแสไหล (Upstream) หากสังเกตจากเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบ (d), (e) และ (f) ของผนังด้าน Trailing มีการปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าที่ผนังด้าน Leading ทำให้มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงกว่าอยู่เล็กน้อย

รูปที่ 4.39 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ โดยรูปแสดงแรงที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลอีกทั้งยังมีการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วในแต่ละระนาบแสดงดังรูป สำหรับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ระนาบ (a) การกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่พัดพาเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ทในตำแหน่งใกล้ทางออกให้ไหลออกไปทำให้ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณนี้ต่ำกว่าที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ อย่างมาก

กรณีค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0046$ ระยะพุ่งชน $H=6D$ การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มลดลงตามค่าตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการจำลองการไหลนี้ใช้ความเร็วสูงสุดในการทดลอง สังเกตได้ว่าค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing ต่ำลงเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่งเล็กน้อย ที่ระนาบ (b), (c), (d), (e) และ (f) เวกเตอร์ความเร็วที่ออกจากปากทางออกเจ็ทไม่มีการหมุนวนภายในช่องการไหลเหมือนที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ เนื่องจากทางออกของอากาศมีขนาดใหญ่กว่าและเวกเตอร์ความเร็วบางส่วนในช่องใกล้กับทางออกของช่องการไหลมีทิศทางที่ไม่ตั้งฉากเหมือนในช่วงก่อนกระแสไหล (Upstream)



รูปที่ 4.38 การกระจายของค่าสเกลิตันเบอร์แสดงร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$
 รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 9,000$)



รูปที่ 4.39 การกระจายของค่าตัวเลขตัวนำเมเบอร์แสดงร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่

ระยะพุ่งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 9,000)

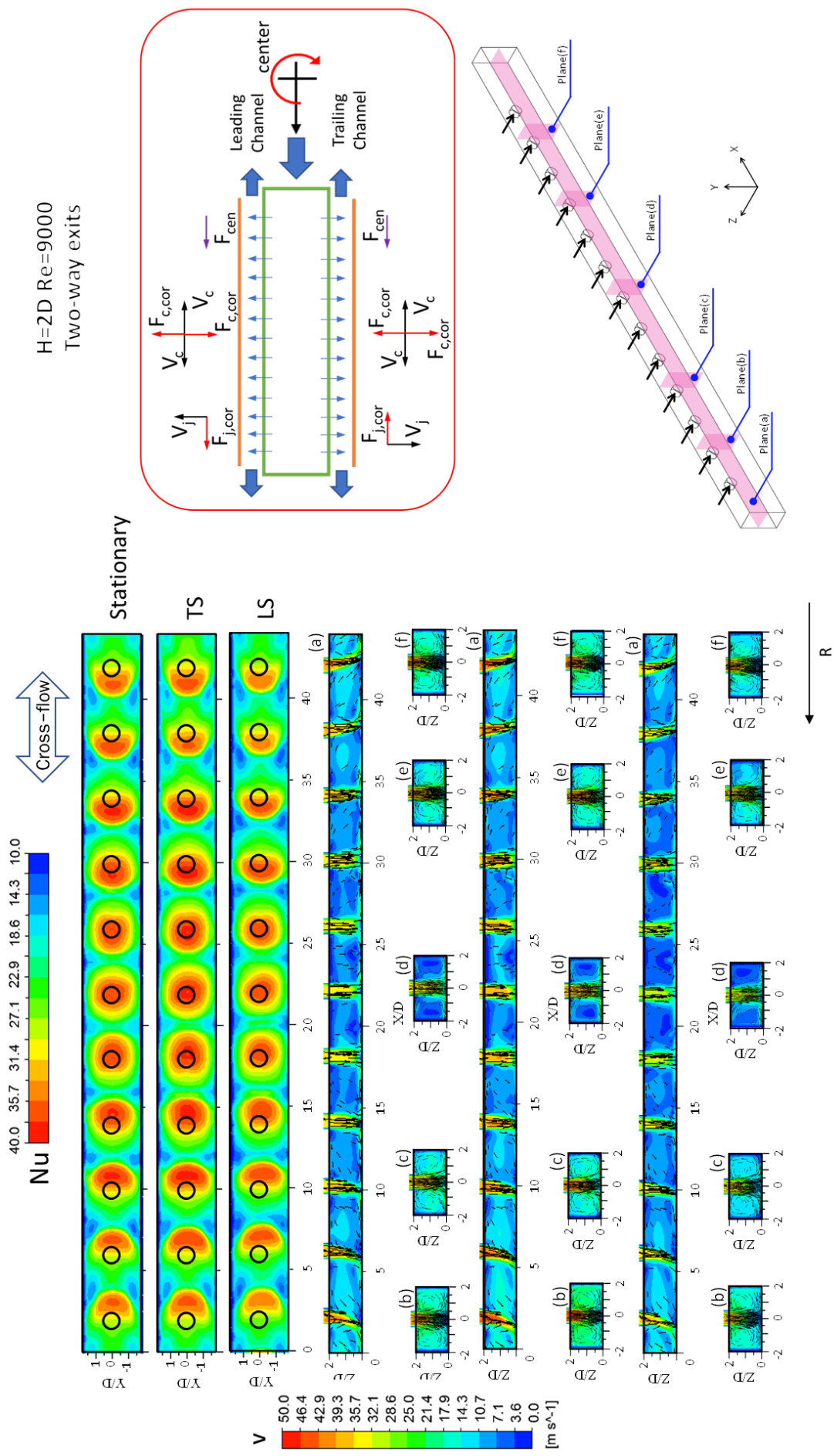
4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะการไหลกรณีรูปแบบทางออก Two-way exits

รูปที่ 4.40 แสดงการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์ร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re=9,000$) โดยรูปแสดงแรงที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลอีกทั้งยังมีการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วในแต่ละระนาบแสดงดังรูป สำหรับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) มีความสม่ำเสมอของการกระจายค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์มากที่สุดในทุกรูปแบบทางออก เนื่องจากมีทางออกของอากาศมากทำให้แทบไม่ได้รับอิทธิพลจากกระแสไหลตัดส่งผลให้รูปแบบทางออก Two-way exits ที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ ให้ค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ

กรณีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0046$ ระยะฟุ้งชน $H=2D$ การกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์มีความสม่ำเสมอและใกล้เคียงกัน สังเกตจากการกระจายความเร็วที่ออกจากปากทางออกเจ็ทมีความใกล้เคียงกันมากที่สุดเป็นที่มาของการให้ค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์ที่สม่ำเสมอ โดยเวกเตอร์ความเร็วที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับทางออกของช่องการไหลทั้งสองฝั่งมีการไหลวนของเวกเตอร์ภายในช่องการไหลมากกว่าที่ตำแหน่งตรงกลางที่เวกเตอร์ความเร็วสามารถปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่า อีกทั้งยังเป็นตำแหน่งที่มีความเร็วของเจ็ทที่ต่ำที่สุดอีกด้วย

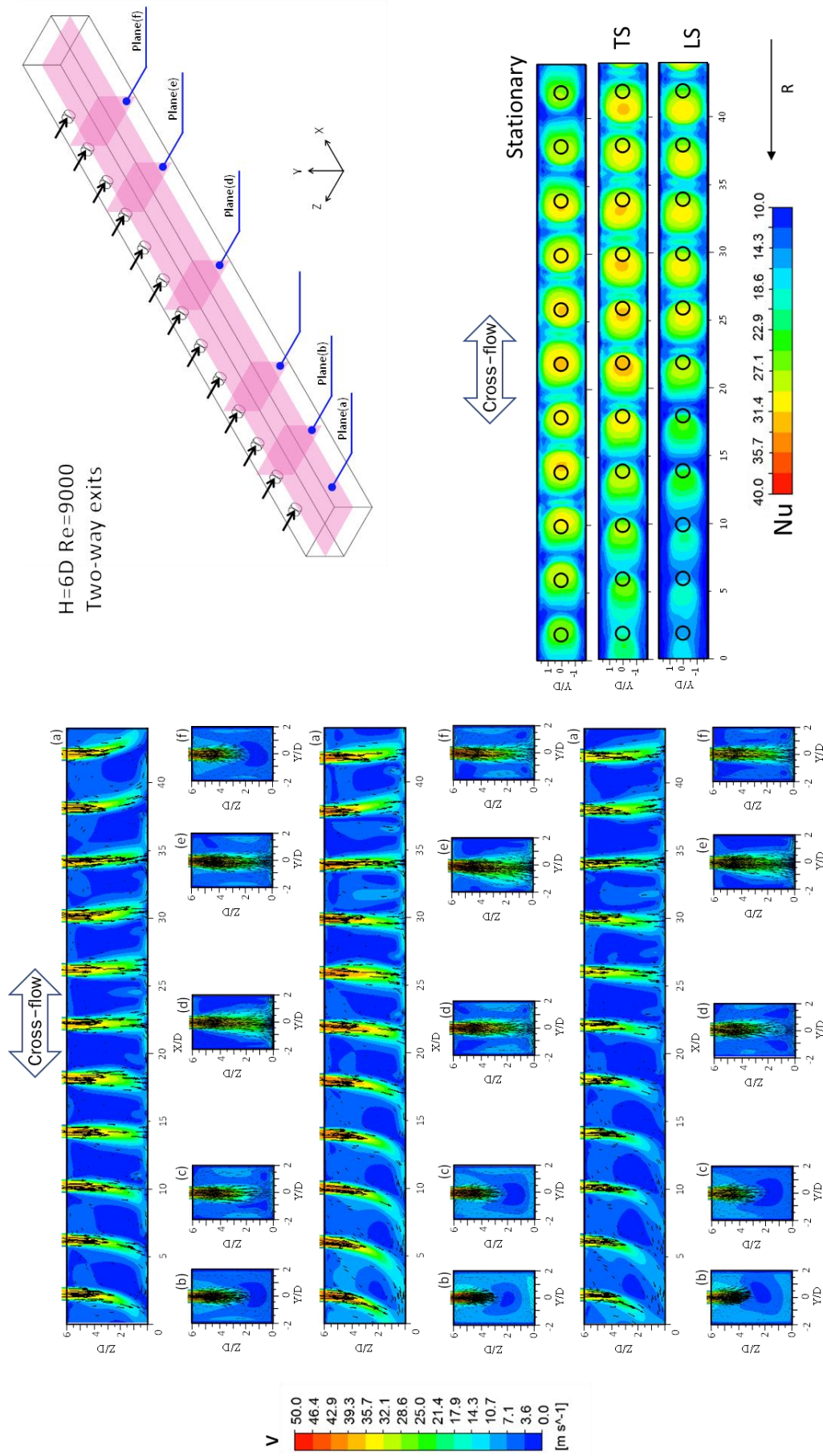
รูปที่ 4.41 แสดงการกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์ร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ โดยรูปแสดงแรงที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลอีกทั้งยังมีการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วในแต่ละระนาบแสดงดังรูป สำหรับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ยังคงมีการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่สม่ำเสมออยู่ แต่มีค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์ต่ำกว่าที่ระยะฟุ้ง $H=2D$ เนื่องจากเวกเตอร์ความเร็วที่ฟุ้งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงตามระยะฟุ้งชนที่เพิ่มขึ้น

กรณีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0046$ ระยะฟุ้งชน $H=6D$ การหมุนทำให้การกระจายของค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์เหมือนช่องการไหลที่มีทางออกเพียงแค่ว่าทางเดียว แต่เวกเตอร์ความเร็วถูกพาออกไปทางด้านไกลจากแกนการหมุนน้อยกว่า หากสังเกตเวกเตอร์ความเร็วที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับทางออกฝั่งแกนการหมุนจะมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวต่างจากในกรณีหยุดนิ่ง และเวกเตอร์ความเร็วที่ตำแหน่งใกล้เคียงทางออกฝั่งไกลจากแกนการหมุนนั้นถูกพัดพาให้เอียงตัวออกมากกว่าเดิมทำให้กรณีที่มีการหมุนค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนผนังด้าน Leading และ Trailing มีค่าน้อยกว่าในกรณีหยุดนิ่ง



H=2D Re=9000
Two-way exits

รูปที่ 4.40 การกระจายของค่าสเกลิตันเบอ์แสดงร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็ว
ที่ระยะพุงชน H=2D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)



รูปที่ 4.41 การกระจายของค่าไนส์เซิลต์ในแมกเน็ทโรดแสดงร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็ว
ที่ระยะพุงชน H=6D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 9,000)

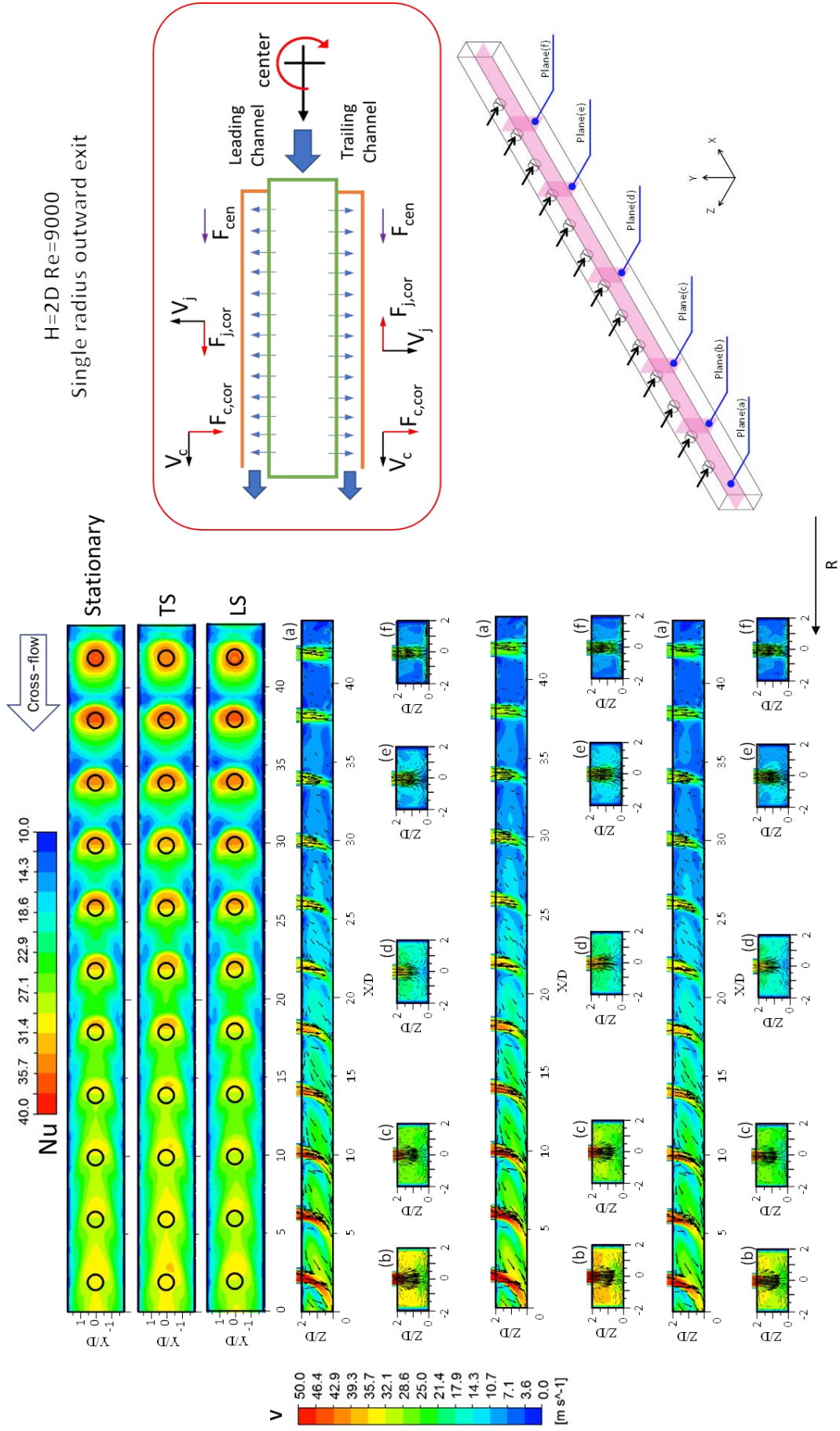
4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะการไหลกรณีรูปแบบทางออก Single radius outward exit

รูปที่ 4.42 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re=9,000$) โดยรูปแสดงแรงที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลอีกทั้งยังมีการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วในแต่ละระนาบแสดงดังรูป สำหรับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ระนาบ (a) เวกเตอร์ความเร็วค่อยๆเบนตัวและทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิว จากการกระจายความเร็วสังเกตได้ว่าที่บริเวณก่อนกระแสไหล (Upstream) ความเร็วที่ออกจากปากทางออกเจ็ทมีต่ำกว่าบริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ที่ระนาบ (b), (c) และ (d) เวกเตอร์ความเร็วมีการหมุนวนภายในช่องการไหลต่างกับที่ระนาบ (e) และ (f) ที่เวกเตอร์ความเร็วพุ่งเข้าปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากกว่า ส่งผลให้มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงกว่า

กรณีค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0046$ ระยะพุ่งชน $H=2D$ การกระจายความเร็วที่ระนาบ (a) ของผนังด้าน Leading และ Trailing มีการกระจายความเร็วที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ทช่วงหลังกระแสไหล (Downstream) มีค่าสูงกว่าช่วงก่อนกระแสไหล (Upstream) หากสังเกตจากเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบ (b), (c) และ (d) ของผนังด้าน Trailing มีการปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าที่ผนังด้าน Leading ทำให้มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์สูงกว่าอยู่เล็กน้อย

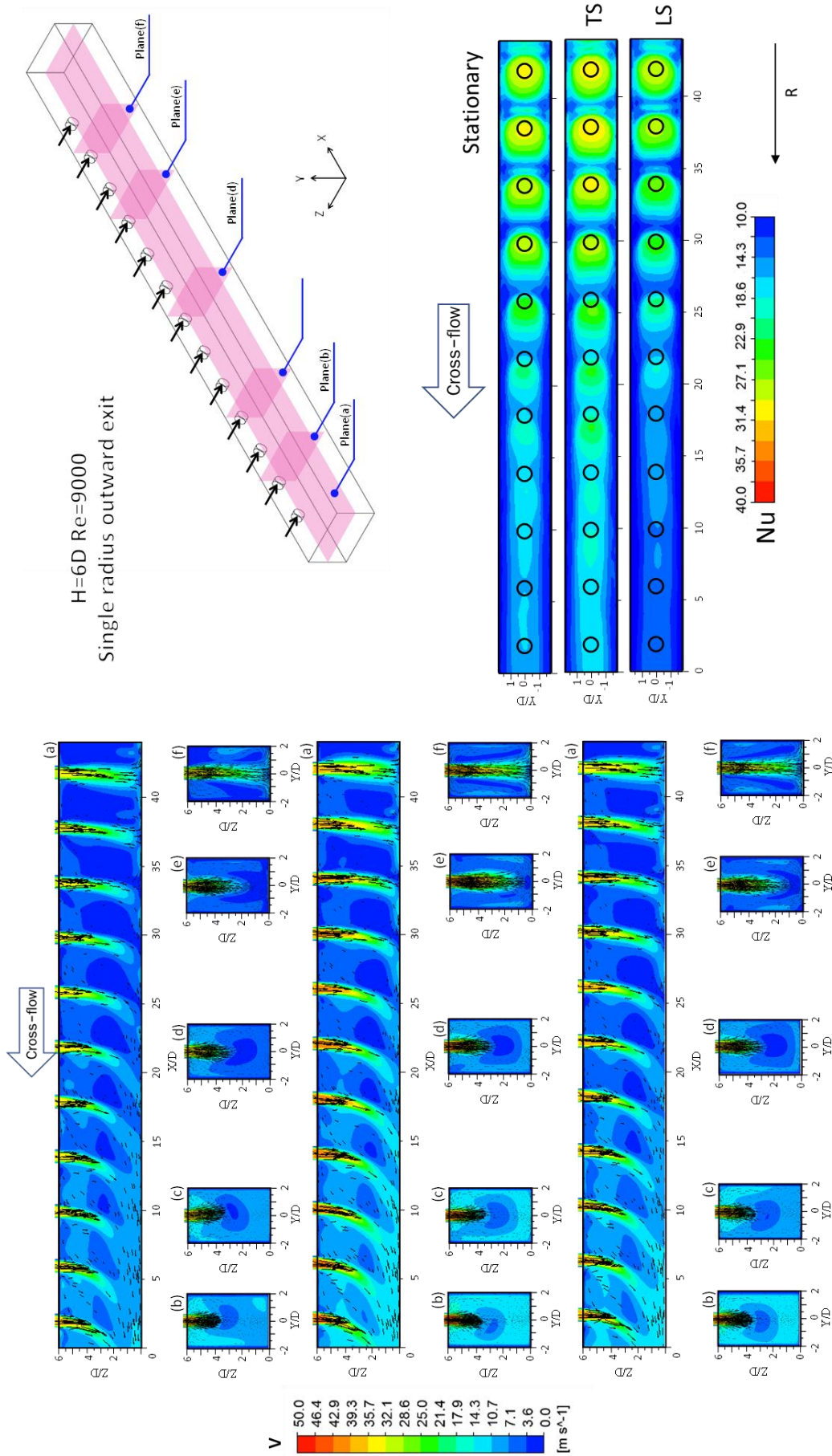
รูปที่ 4.43 แสดงการกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ โดยรูปแสดงแรงที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลอีกทั้งยังมีการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วในแต่ละระนาบแสดงดังรูป สำหรับกรณีช่องการไหลหยุดนิ่ง (Stationary) ที่ระนาบ (a) การกระจายความเร็วแสดงให้เห็นถึงความเร็วที่ออกจากปากทางออกเจ็ทที่แตกต่างกันระหว่างช่วงก่อนกระแสไหล (Upstream) และหลังกระแสไหล (Downstream) แต่ยังคงมีความแตกต่างกันของความเร็วน้อยกว่าที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ โดยค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ลดลงตามระยะพุ่งชนที่เพิ่มขึ้น

กรณีค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0046$ ระยะพุ่งชน $H=6D$ ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ของผนังด้าน Trailing สูงกว่าที่ผนังด้าน Leading อาจส่งผลมาจากแรงโคริออลิสที่กระทำกับกระแสไหลตัดภายในช่องการไหล ที่ระนาบ (a) การกระจายความเร็วของผนังทั้งสองฝั่งไม่ได้มีความต่างกันสักเท่าไรหรอก แต่หากสังเกตที่ระนาบ (b) และ (d) แสดงการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วจะสังเกตได้ถึงความแตกต่างที่ผนังด้าน Trailing มีเวกเตอร์ความเร็วมากกว่าส่งผลให้มีค่านัสเซิลต์นัมเบอร์มากกว่าเช่นกัน



รูปที่ 4.42 การกระจายของค่าสเกลิตันัมเบอร์แสดงร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่

ระยะพุงชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 9,000$)



รูปที่ 4.43 การกระจายของค่าเฉลี่ยต้นแบบที่แสดงร่วมกับการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่ระยะฟุ้งชน

H=6D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 9,000)

4.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่พื้นผิว

ในส่วนนี้ได้อธิบายเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่พื้นผิว โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่พื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 และรูปแบบทางออกของช่องการไหลทั้ง 3 รูปแบบ คือ Single radius inward exit, Two-way exits และ Single radius outward exit ตามลำดับ โดยจะอธิบายในแต่ละกรณีรูปแบบทางออกของช่องการไหลต่างๆ

(1) กรณีรูปแบบทางออก Single radius inward exit

รูปที่ 4.44 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่พื้นผิว ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=9,000$ ระยะพุ่งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0046 ซึ่งจะอธิบายได้ถึงการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่พื้นผิวบนผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง ที่รูปแบบทางออก Single radius inward exit

ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่พื้นผิวของผนังด้าน Leading สามารถแบ่งช่วงการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์การไหลได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่มีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ และ 0.0018 ตามลำดับ เป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพิ่มขึ้นสูงสุดสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การไหลได้ 4.12% และ 6.51% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และในช่วงที่สองค่าสัมประสิทธิ์การไหลลดลงจากค่าสัมประสิทธิ์การไหลสูงสุด อันเนื่องมาจากแรงหนีศูนย์กลางที่มีขนาดมากขึ้นตามตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลค่อยๆ ลดต่ำลง แต่ยังคงมีค่าสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งอยู่เล็กน้อย ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0028$, 0.0037 และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพิ่มขึ้น 5.39%, 5.32% และ 4.69% ตามลำดับ ส่วนของผนังด้าน Trailing นั้นมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การไหลสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งแต่มีค่าลดน้อยลงตามแรงหนีศูนย์กลางที่มีทิศทางสวนกับกระแสไหลตัดภายในช่องการไหลที่ต้องการไหลออกจากทางออก ที่มีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$, 0.0018 , 0.0028 , 0.0037 และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพิ่มขึ้น 9.68%, 8.53%, 7.25%, 6.07% และ 4.70% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง

ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การไหลที่พื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การไหลเช่นเดียวกันคือค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพิ่มขึ้นสูงที่สุดที่มีค่าตัวเลขการหมุนเท่ากับ 0.0009 หลังจากนั้นมีการลดลงตามตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้น ที่ผนังด้าน Leading มีค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น มีเพียงที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0046$ ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่งเล็กน้อย ในส่วนผนังด้าน Trailing ที่มีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$, 0.0018 , 0.0028 , 0.0037 และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์การไหลเพิ่มขึ้น 6.19%, 4.76%, 4.32%, 3.86% และ 1.54% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง

นี้ เมื่อพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในช่องการไหลด้าน Trailing พบว่าแรงโครีออริสที่กระทำกับลำเจ็ทมีทิศสวนทางกับแรงหนีศูนย์กลางต่างจากในด้าน Leading ที่ทิศทางโครีออริสที่กระทำกับลำเจ็ทมีทิศเสริมกับแรงหนีศูนย์กลางทำให้มีค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยที่ต่ำกว่า

ที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเหมือนกับที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ คือ ที่ผนังด้าน Leading แบ่งช่วงการเพิ่มของค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่มีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ และ 0.0018 ตามลำดับ เป็นช่วงที่ค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นสูงสุดสามารถเพิ่มค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยได้ 2.55% และ 3.22% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง หลังจากนั้นค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยจะลดต่ำกว่าค่าสูงสุด ส่วนของผนังด้าน Trailing นั้นมีแนวโน้มของค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งแต่มีค่าลดน้อยลงตามแรงหนีศูนย์กลางที่มีทิศทางสวนกับกระแสไหลตัดภายในช่องการไหลที่ต้องการไหลออกจากทางออก ที่มีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028, 0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 6.37%, 3.51%, 3.49%, 2.32% และ 1.23% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง

(2) กรณีรูปแบบทางออก Two-way exits

รูปที่ 4.45 แสดงค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=9,000$ ระยะพุ่งชน $H=2D, 4D$ และ $6D$ ตามลำดับ ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ $R_o=0$ ถึง 0.0046 ซึ่งจะอธิบายได้ถึงการเพิ่มของค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวบนผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่งที่รูปแบบทางออก Two-way exits

ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ พบว่าค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีหยุดนิ่งมีค่าสูงที่สุดในทุกรณีที่หยุดนิ่งเนื่องจากมีทางออกของช่องการไหลมากได้รับอิทธิพลจากกระแสไหลตัดน้อย ในผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มของค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยในลักษณะเดียวกัน ผนังทั้งสองด้านสามารถแบ่งช่วงของการเพิ่มค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่มีค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028$ และ 0.0037 ตามลำดับ มีค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2.34%, 4.13%, 7.53% และ 7.87% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และช่วงที่สองค่าตัวเลขการหมุนเท่ากับ 0.0046 มีค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยลดลงจากค่าสูงสุดแต่เพิ่มจากกรณีหยุดนิ่งอยู่ 7.29% ส่วนของผนังด้าน Trailing นั้นที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028$ และ 0.0037 ตามลำดับ มีค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2.49%, 2.66%, 5.67% และ 8.40% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0046$ มีค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากกรณีหยุดนิ่งอยู่ 7.35% แต่ลดลงจากค่าสเกลตันัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกับในผนังด้าน Leading

ที่ระยะฟุ้งชน $H=4D$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยทั้งพื้นผิวของผนังด้าน Leading สามารถแบ่งช่วงการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ และ 0.0018 ตามลำดับ เป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นสูงสุดสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยได้ 3.55% และ 7.61% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และในช่วงที่สองค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยลดลงจากค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยสูงสุด อันเนื่องมาจากแรงหนีศูนย์กลางที่มีขนาดมากขึ้นตามตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยค่อยๆ ลดต่ำลง แต่ยังคงมีค่าสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งอยู่ ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0028$, 0.0037 และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 6.46%, 6.53% และ 2.84% ตามลำดับ ส่วนของผนังด้าน Trailing นั้นที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$, 0.0018 และ 0.0028 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 4.11%, 6.24% และ 7.58% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยลดลงจากค่าสูงสุด แต่ยังคงมีค่าสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งอยู่ 5.91% และ 3.34% ตามลำดับ

ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยทั้งพื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยในลักษณะเดียวกัน ผนังทั้งสองด้านสามารถแบ่งช่วงของการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ และ 0.0018 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.07% และ 3.14% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และช่วงที่สองค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0028$, 0.0037 และ 0.0046 มีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยลดลงจากกรณีหยุดนิ่งอยู่ 0.22%, 5.25% และ 9.28% ตามลำดับ ส่วนของผนังด้าน Trailing นั้นที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009$ และ 0.0018 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.87% และ 2.23% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0028$, 0.0037 และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยลดลงจากกรณีหยุดนิ่งอยู่ 0.20%, 5.15% และ 12.32% ตามลำดับ สังเกตได้ว่ารูปแบบทางออกของช่องการไหลนี้เมื่อระยะฟุ้งชนเพิ่มขึ้นที่ค่าตัวเลขการหมุนสูงมีค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยลดลง เนื่องมาจากช่องการไหลที่เปิดออกทั้งสองฝั่งทำให้ได้รับอิทธิพลจากแรงหนีศูนย์กลางที่มีขนาดเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขการหมุนที่เพิ่มสูงขึ้น

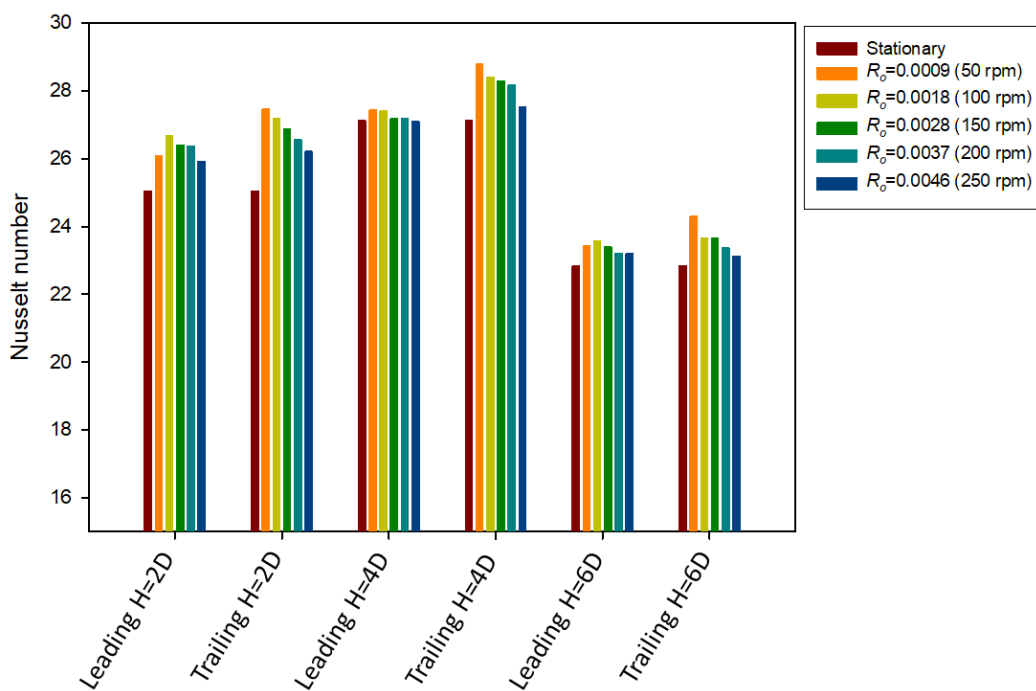
(3) กรณีรูปแบบทางออก Single radius outward exit

รูปที่ 4.46 แสดงค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่เรย์โนลด์น้ำหนักเบอร์ด $Re=9,000$ ระยะฟุ้งชน $H=2D$, $4D$ และ $6D$ ตามลำดับ ค่าตัวเลขการหมุนตั้งแต่ $R_o=0$ ถึง 0.0046 ซึ่งจะอธิบายได้ถึงการเพิ่มของค่าสัมประสิทธิ์น้ำหนักเบอร์ดเฉลี่ยทั้งพื้นผิวบนผนังด้าน Leading และ Trailing เทียบกับกรณีหยุดนิ่งที่รูปแบบทางออก Single radius outward exit

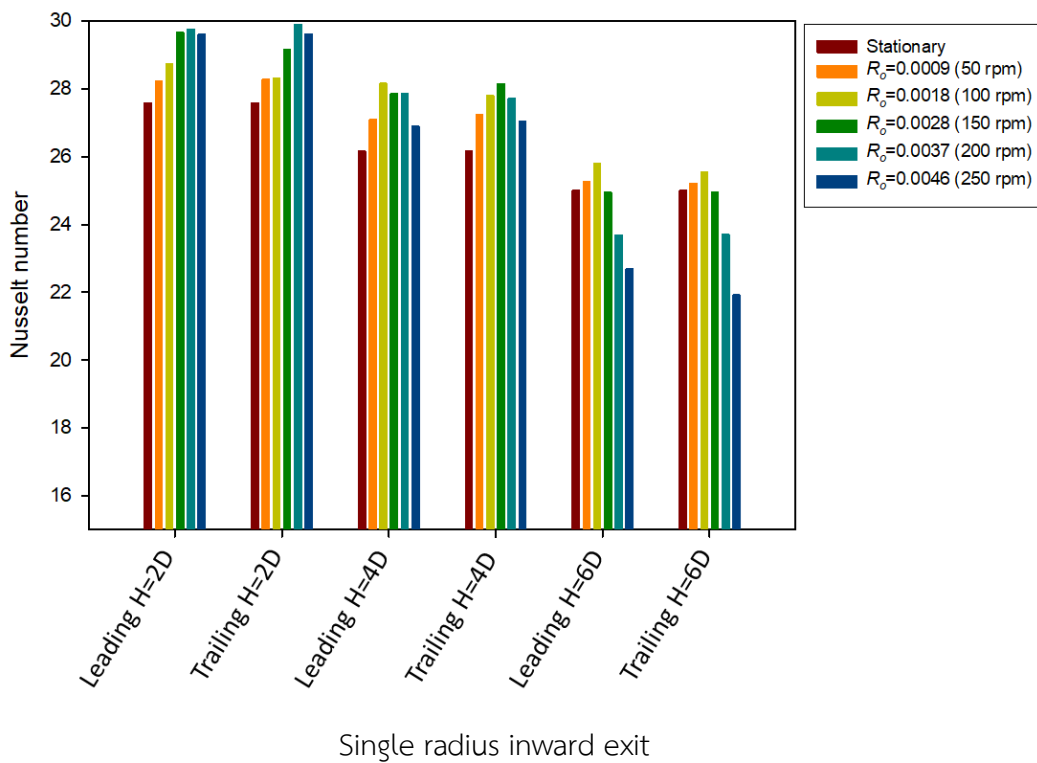
ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ พบว่าค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มของค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขการหมุนในลักษณะเดียวกัน ผนังด้าน Leading ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028, 0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.07%, 4.77%, 6.49%, 11.06% และ 13.39% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และผนังด้าน Trailing นั้นที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028, 0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 7.21%, 8.81%, 12.21%, 13.25% และ 13.52% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง

ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ พบว่าค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มของค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขการหมุนในลักษณะเดียวกัน ผนังด้าน Leading ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028, 0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 1.19%, 3.31%, 6.63%, 9.79% และ 13.29% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และผนังด้าน Trailing นั้นที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028, 0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 6.13%, 6.44%, 7.02%, 7.05% และ 7.38% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง

ที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ พบว่าค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มของค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขการหมุนในลักษณะเดียวกัน ผนังด้าน Leading ที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028, 0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.14%, 4.20%, 9.17%, 13.26% และ 19.81% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง และผนังด้าน Trailing นั้นที่ค่าตัวเลขการหมุน $R_o=0.0009, 0.0018, 0.0028, 0.0037$ และ 0.0046 ตามลำดับ มีค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 4.96%, 5.47%, 6.46%, 9.49% และ 11.44% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง

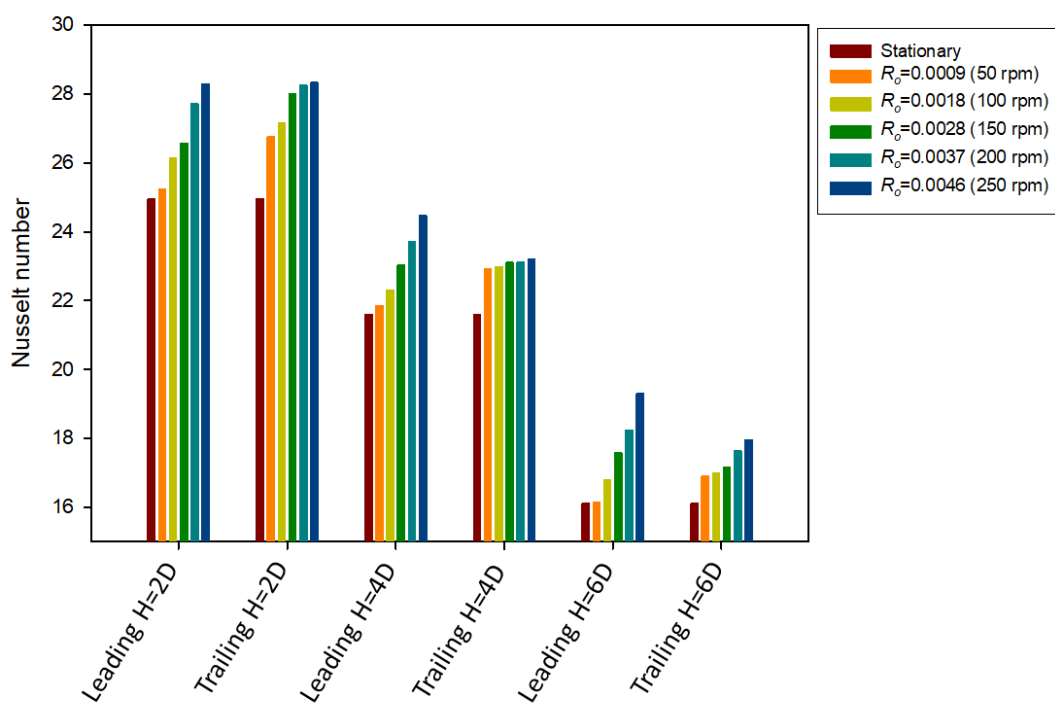


รูปที่ 4.44 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่ระยะพุ่งชน H=2D, 4D และ 6D รูปแบบทางออก



รูปที่ 4.45 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่ระยะพุ่งชน H=2D, 4D และ 6D รูปแบบทางออก

Two-way exits



รูปที่ 4.46 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว ที่ระยะพุ่งชน H=2D, 4D และ 6D รูปแบบทางออก Single radius outward exit

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนเชิงทฤษฎีในช่องการไหลที่หมุน โดยทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้ดหนึ่ง เปรียบเทียบกับผนังด้าน Leading และ Trailing ภายใต้เงื่อนไขค่าตัวเลขเรย์โนลด์ $Re=6,000, 7,500$ และ $9,000$ ระยะพุ่งชน $H=2D, 4D$ และ $6D$ มีความกว้างของช่องการไหลและระยะห่างระหว่างรูเจ็ทคองที่ $S=4D$ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจ็ท $D=5$ mm ตัวเลขการหมุน R_o ตั้งแต่ 0 ถึง 0.0069 โดยคำนวณมาจากความเร็วรอบการหมุน $N=0, 50, 100, 150, 200$ และ 250 rpm ตามลำดับ ซึ่ง รูปแบบทางออกของช่องการไหล ถูกกำหนดไว้ 3 รูปแบบ โดยรูปแบบที่ 1 คือ Single radius inward exit มีทางออกของช่องการไหลทางเดียวมีทิศทางการไหลเข้าหาแกนการหมุน รูปแบบที่ 2 คือ Single radius outward exit มีทางออกของช่องการไหลทางเดียวมีทิศทางการไหลออกจากแกนการหมุน และรูปแบบที่ 3 คือ Two-way exits มีทางออกของช่องการไหลสองทางผลการศึกษารูปได้ดังนี้

(1) จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่รูปแบบทางออกของช่องการไหลที่รูปแบบ Single radius inward exit พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งพื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนที่เหมือนกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าสูงสุดที่ค่าตัวเลขการหมุนไม่เกิน 0.0018 เท่านั้น หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนจะลดต่ำลงตามค่าตัวเลขการหมุนที่เพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีค่าสูงกว่าที่กรณีหุ้ดหนึ่ง ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ และ $4D$ ตามลำดับ

(2) สำหรับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Single radius outward exit พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนทั้งพื้นผิวของผนังด้าน Leading และ Trailing มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขการหมุนในลักษณะเดียวกัน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามค่าตัวเลขการหมุนที่สูงขึ้น การกระจายของค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมีความใกล้เคียงกับรูปแบบทางออก Single radius inward exit เนื่องจากอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนในช่วงหลังกระแสไหล (Downstream) มีค่าต่ำกว่าในช่วงก่อนกระแสไหล (Upstream) อีกทั้งกระจายความเร็วยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างความเร็วของเจ็ทในแต่ละตำแหน่ง หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชนต่างๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำลงตามระยะพุ่งชนที่เพิ่มมากขึ้น

(3) สำหรับผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน ที่มีรูปแบบทางออกของช่องการไหลที่รูปแบบทางออก Two-way exits ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ ในกรณีหยุดนิ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกรณีที่หยุดนิ่ง อีกทั้งยังมีความสม่ำเสมอของการกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากอีกด้วย โดยในกรณีนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของรูปแบบ Single radius inward exit และ Single radius outward exit ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ เท่ากับ 10.17% และ 10.56% ตามลำดับ เนื่องมาจากรูปแบบทางออกของช่องการไหลที่มีทางออกสองทาง ส่งผลให้อากาศไหลออกจากช่องการไหลได้เร็วและได้รับอิทธิพลจากกระแสไหลตัดน้อย สังเกตได้จากการกระจายความเร็วและเวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณปากทางออกเจ็ทมีความเร็วในแต่ละตำแหน่งเจ็ทที่ใกล้เคียงกันต่างจากอีกสองรูปแบบที่มีทางออกของช่องการไหลเพียงทางเดียว จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของรูปแบบทางออกนี้มีค่าสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความเร็วการหมุนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่หมุน ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มขอบเขตในการทำวิจัยดังนี้

(1) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้การจัดเรียงรูปแบบของรูเจ็ทในลักษณะอื่นเพื่อหารูปแบบที่ดีที่สุดในการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อน

(2) ศึกษาการการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตัวสร้างความปั่นป่วน

(3) ศึกษาพฤติกรรมกรการไหลโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Ver.15.0 (Fluent) ที่เงื่อนไขตามการทดลองทั้งหมดเพื่อเปรียบเทียบกับค่าการถ่ายเทความร้อนที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Terzis, A., **(2014)**, “Detailed heat transfer distributions of narrow impingement channels for integrally cast turbine airfoils.” Lausanne, March 24, Retrieved from: http://infoscience.epfl.ch/record/198696/files/EPFL_TH6177.pdf
- [2] Shukla, A.K., **(2017)**, “Convective Heat Transfer Enhancement using Slot Jet Impingement on a Detached Rib Surface” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 10(6), pp. 1615-1627.
- [3] Jambunathan, K., Lai, E., Moss, M.A., Button, B.L., **(1992)**, “A review of heat transfer data for single circular jet impingement”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.13, pp. 106-115.
- [4] Viskanta, R., **(1993)**, “Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.6, pp.111-134.
- [5] Baughn, J.W., and Shimizu, S., **(1998)**, “Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet”, *Heat Transfer*, Vol. 111, No.4, pp. 1096–1098.
- [6] San, J.Y., and Lai, M.D., **(2001)**, “Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 21, pp. 3997-4007.
- [7] Esposito, E.I. , **(2006)**, “Jet impingement cooling configurations for gas turbine combustion”, Thesis of Master in Mechanical Engineering, Louisiana State University.
- [8] Geers, L.F.G., Tummers, M.J., Bueninck, T.J., and K. Hanjalic, **(2008)**, “Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 21-22, pp. 5389-5399
- [9] Rau, G., Cakan, M., Moeller, D. and Arts, T., **(1998)**, “The effect of periodic ribs on the local aerodynamic and heat transfer performance of a straight cooling channel.” *ASME Journal of Turbomachinery*, vol. 120, pp. 368-375.

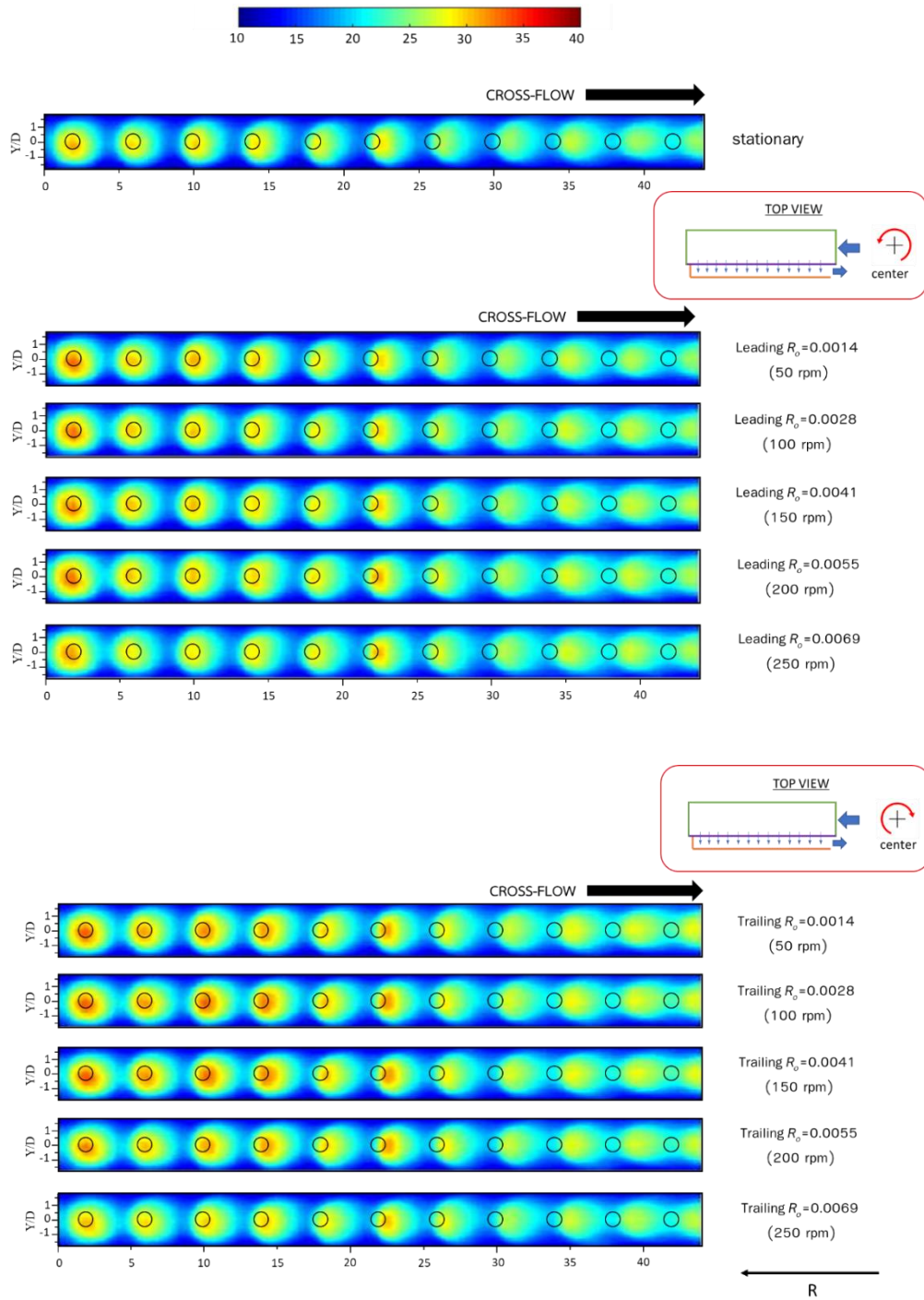
- [10] Salim, M. and Cheah, S.C., **(2009)**, “Wall y^+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows,” International MultiConference of Engineering and Computer Scientists, vol. 2, March 18-20, Hong Kong.
- [11] Brakmann, R., Chen, L., Poser, R., Rodriguez, J., Crawford, M., and Weigand, B., **(2019)**. Heat transfer investigation of an array of jets impinging on a target plate with detached ribs, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 78 108420.
- [12] Chi, Z., Kan, R., Ren, J., and Jiang, H., **(2013)**. Experimental and numerical study of the anti-crossflows impingement cooling structure, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 64 pp. 567-580.
- [13] Park, J.S., Han, J.C., Huang, Y., Ou, S., and Boyle, R.J., **(1992)**, “Heat transfer performance comparisons of five different rectangular channels with parallel angled ribs.” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 35(11), pp. 2891-2903.
- [14] Dutta, S., Andrews, M.J., and Han, J.C., **(1995)**, “On the simulation of turbulent heat transfer in a rotating duct.” AIAA Journal of Thermophysics and heat transfer, vol. 9(2), pp.129-144.
- [15] Liou, T.M., and Hwang, J.J., **(1993)**, “Effect of ridge shapes on turbulent heat transfer and friction in a rectangular channel.” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 36(4), pp. 931-940.
- [16] Wagner, J.H., Johnson, B.V., and Kopper, F.C., **(1992)**, “Heat transfer in rotating serpentine passage with trips normal to the flow.” ASME Journal of Turbomechanics, vol.113, pp.321-330.
- [17] Guidez, J., **(1989)**, “Study of the convective heat transfer in a rotating coolant channel.” ASME Journal of Turbomechanics, vol. 111, pp. 43-50.
- [18] Elston, C.M. and Wright, L.M., **(2015)**, “Leading Edge Jet Impingement Under High Rotation Numbers.” Journal of Thermal Science and Engineering Applications, vol. 120, pp. 368-375.
- [19] Chang, W.S. and Yu, K., **(2019)**, “Thermal performance of radially rotating trapezoidal channel with impinging jet-row” International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 136, pp. 246-264.

- [20] Yang, L., Tyag, K., Ekkad, S., and Ren, J, **(2015)**, “Influence of Rotation on Heat Transfer in A Two-pass Channel with Impingement Under High Reynolds Number” Turbine Technical Conference and Exposition, June 15-19, Canada.
- [21] Pason, J.A., Han, J.C. and Lee, C.P., **(1998)**, “Rotation Effect on Jet Impingement Heat Transfer in Smooth Rectangular Channels With Four Heated Walls and Radially Outward Crossflow” Journal of Turbomachinery, vol. 120, pp. 79-85.
- [22] Lamont, J.A., Ekkad, S.V. and Alvin, M.A., **(2012)**, “Effects of Rotation on Heat Transfer for a Single Row Jet Impingement Array With Crossflow” Journal of Heat Transfer, vol. 134, pp. 082202.

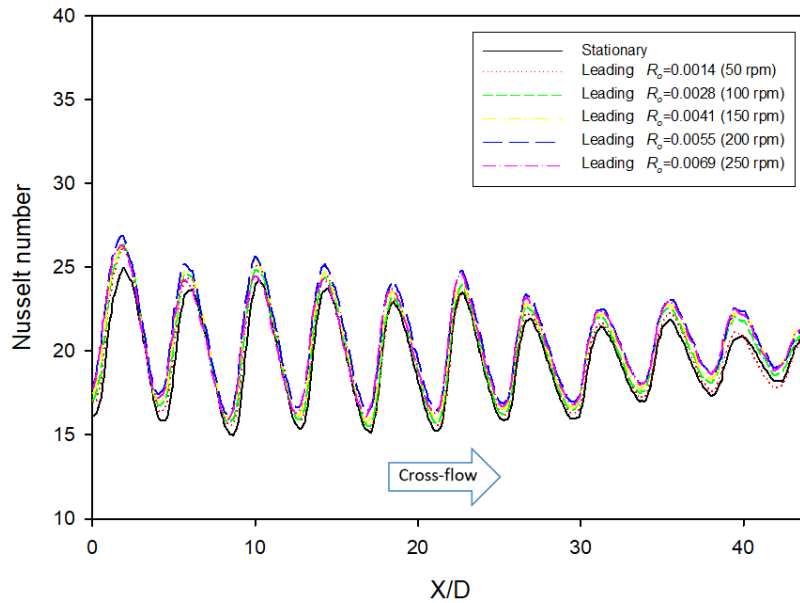
ภาคผนวก ก. ผลการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลแบบหมุน
ที่ $Re=6,000$ และ $7,500$

H=2D Re=6000

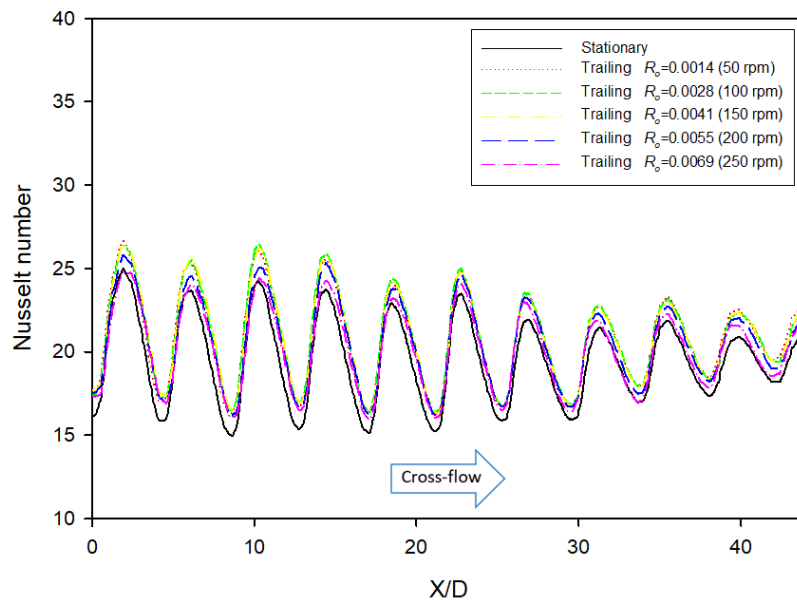
Single radius inward exit



รูปที่ ก.1 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 6,000$)



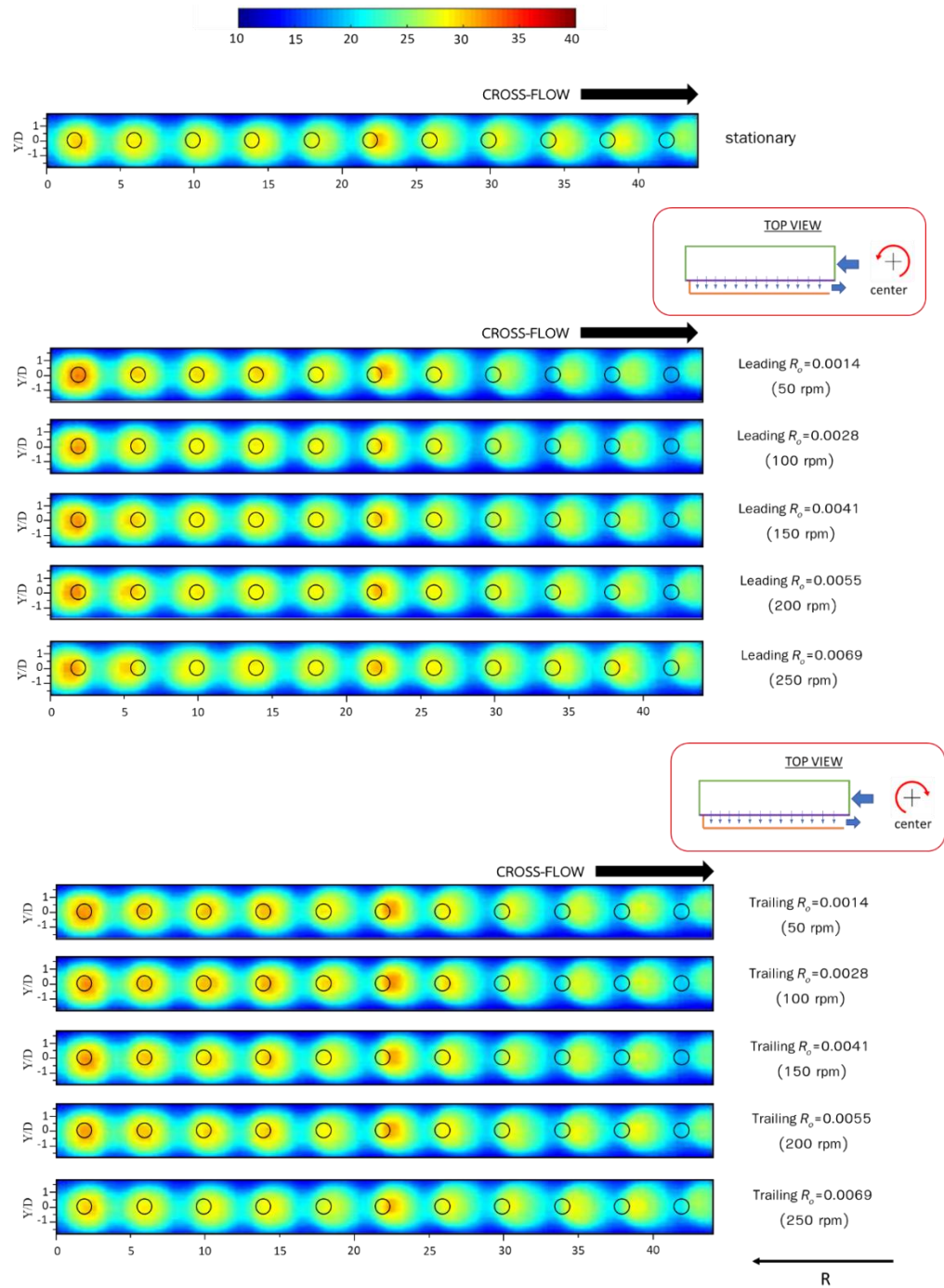
รูปที่ ก.2 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 6,000$)



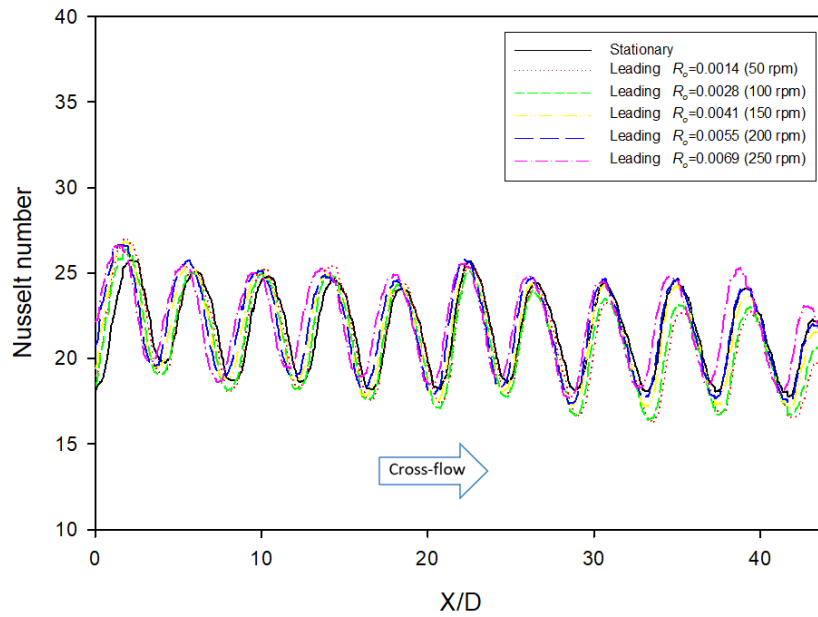
รูปที่ ก.3 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 6,000$)

H=4D Re=6000

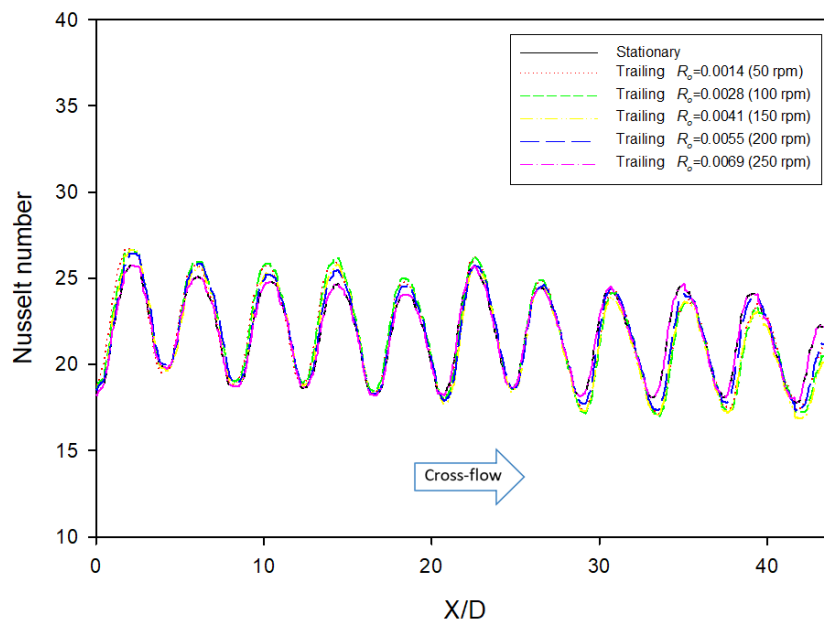
Single radius inward exit



รูปที่ ก.4 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=4D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 6,000)



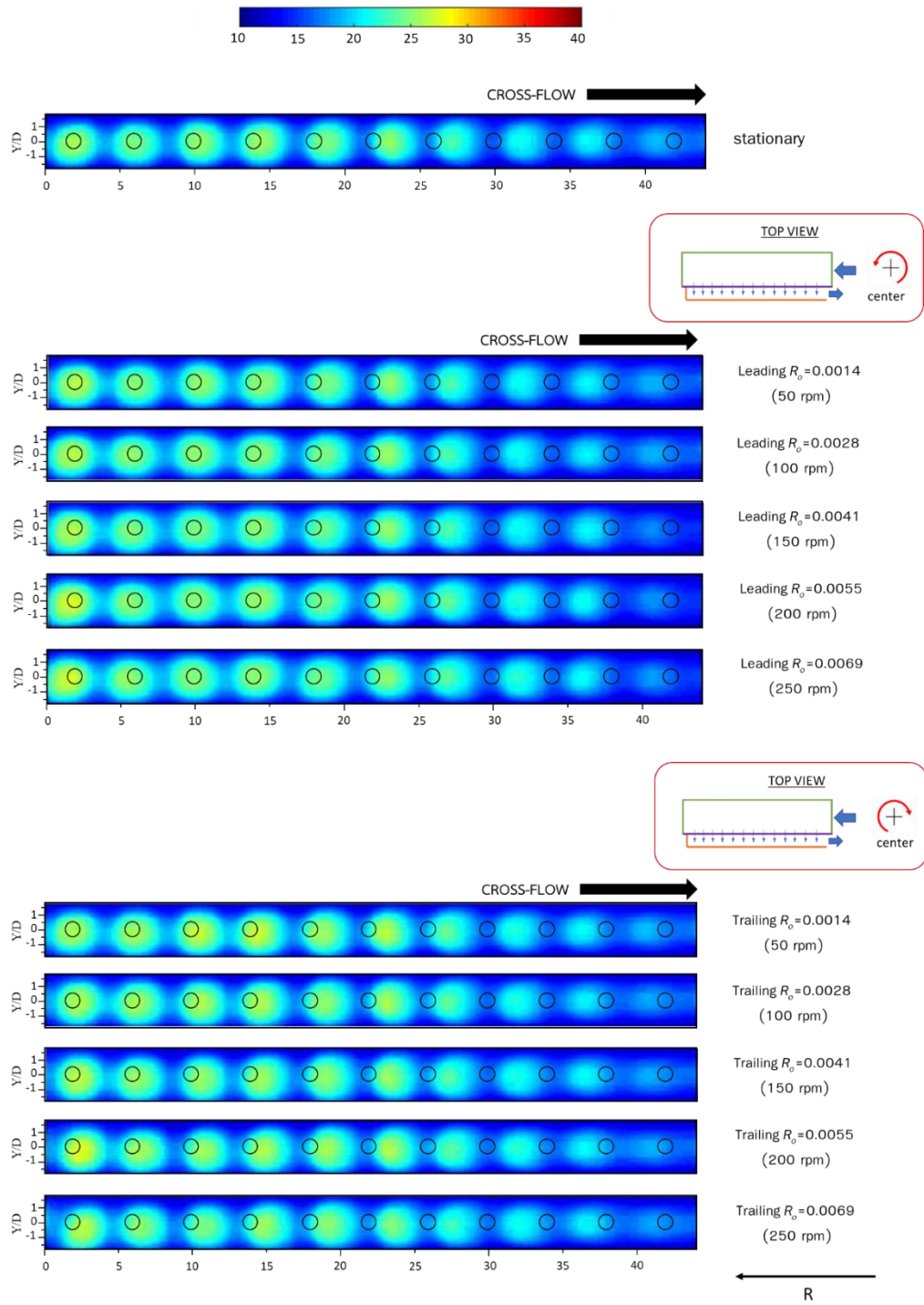
รูปที่ ก.5 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 6,000$)



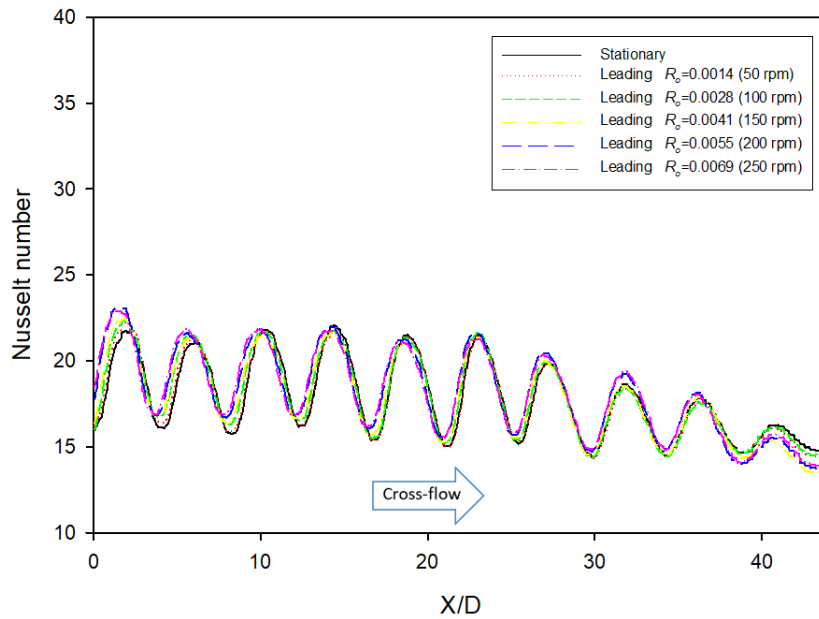
รูปที่ ก.6 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 6,000$)

H=6D Re=6000

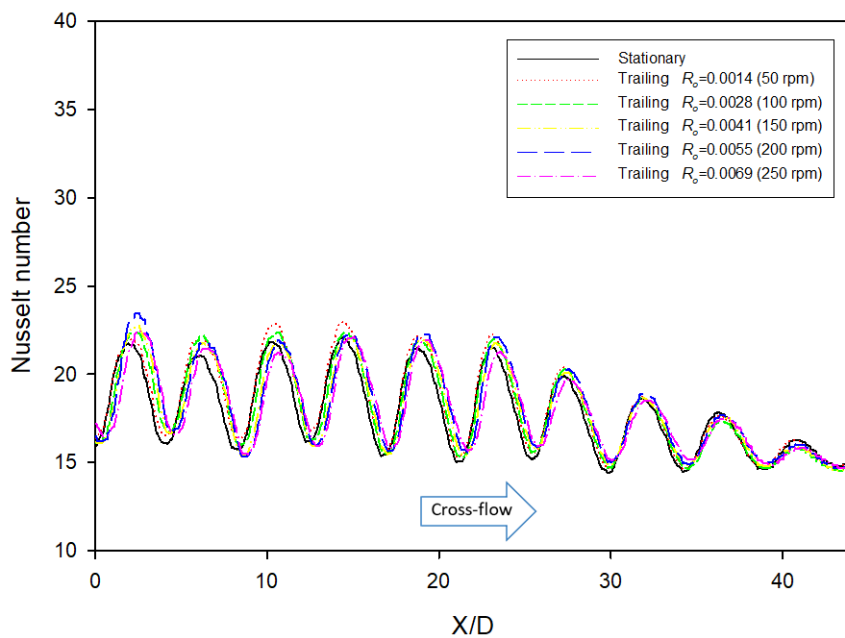
Single radius inward exit



รูปที่ ก.7 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 6,000)



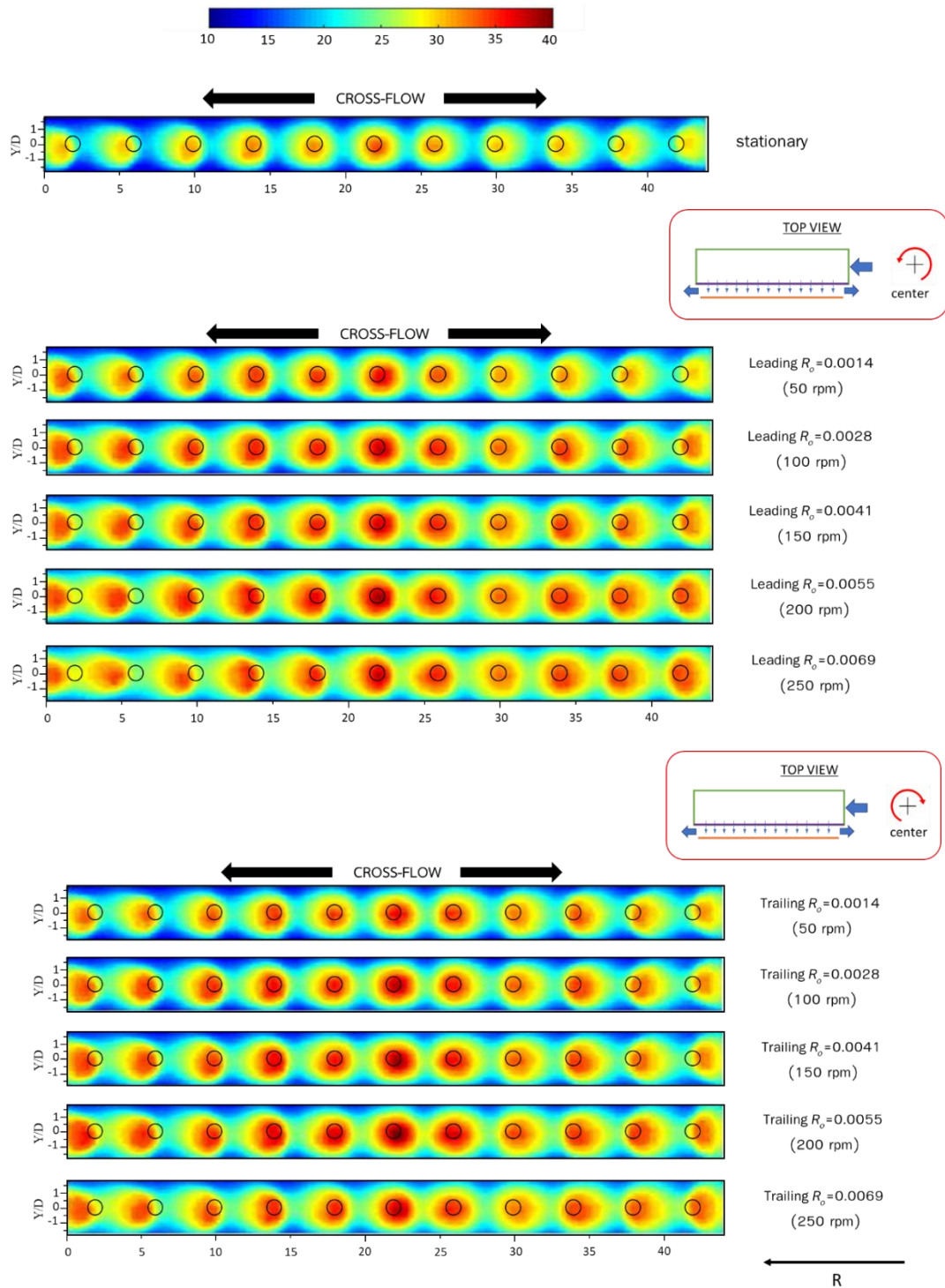
รูปที่ ก.8 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 6,000$)



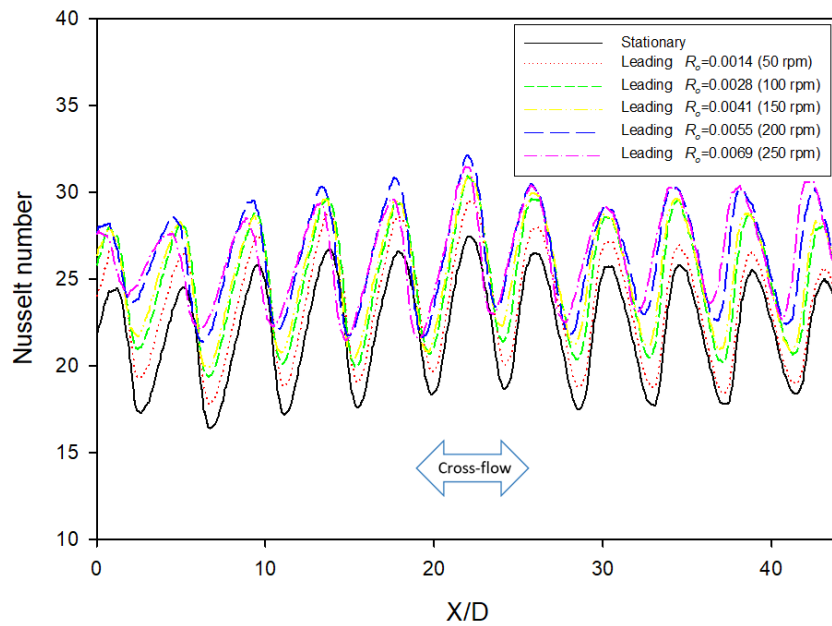
รูปที่ ก.9 คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 6,000$)

H=2D Re=6000

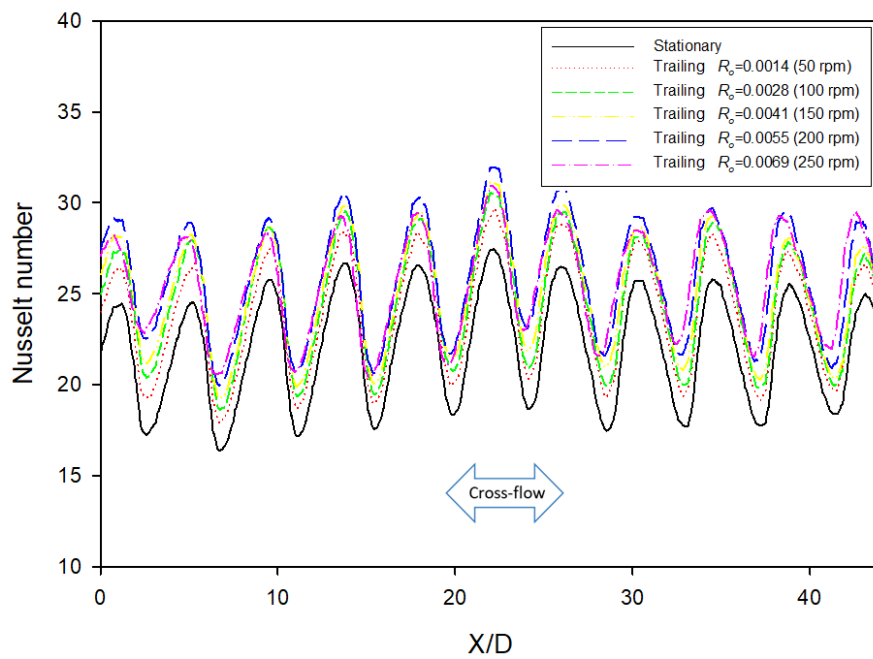
Two-way exits



รูปที่ ก.10 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 6,000)



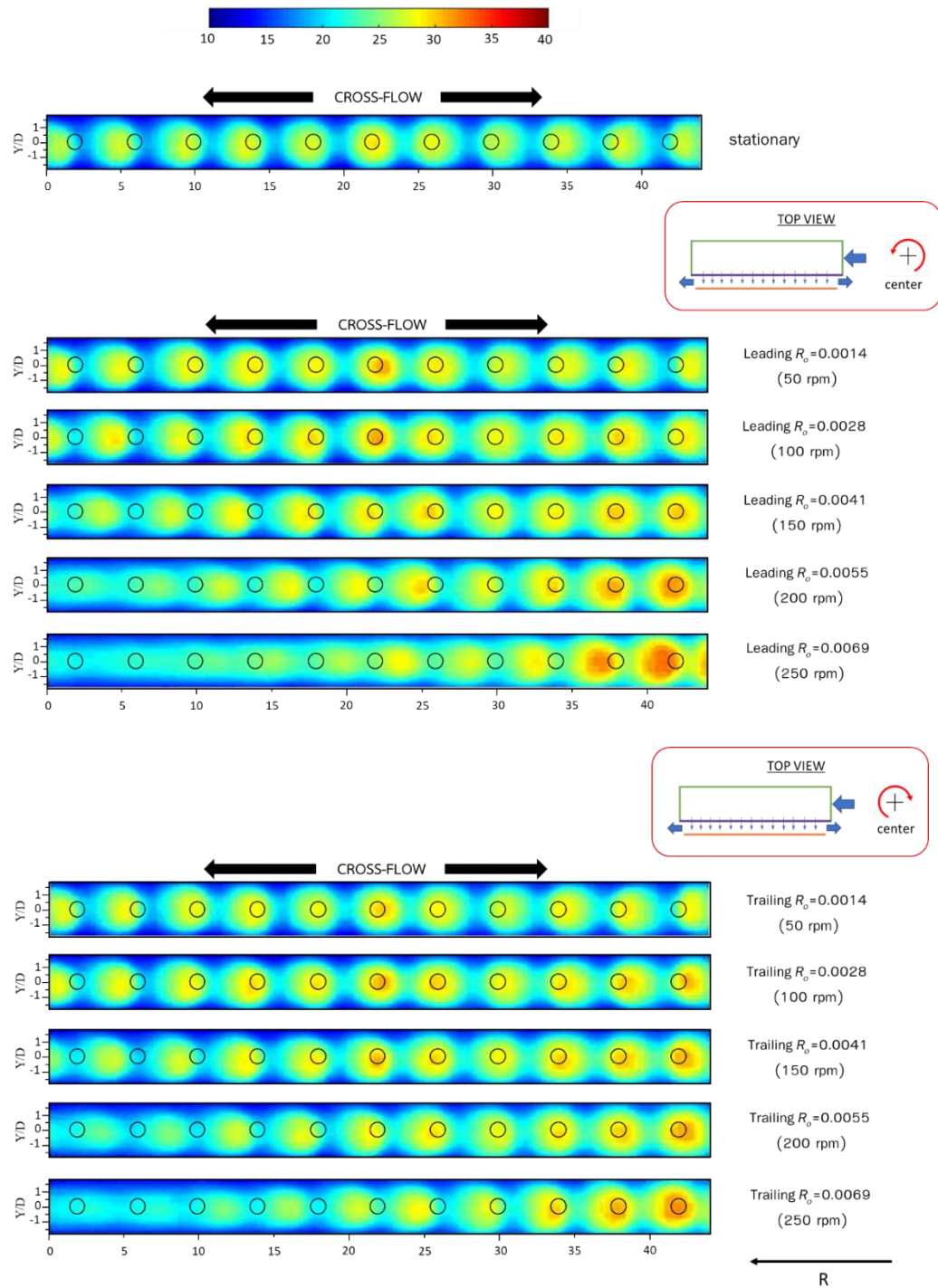
รูปที่ ก.11 คำนัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 6,000$)



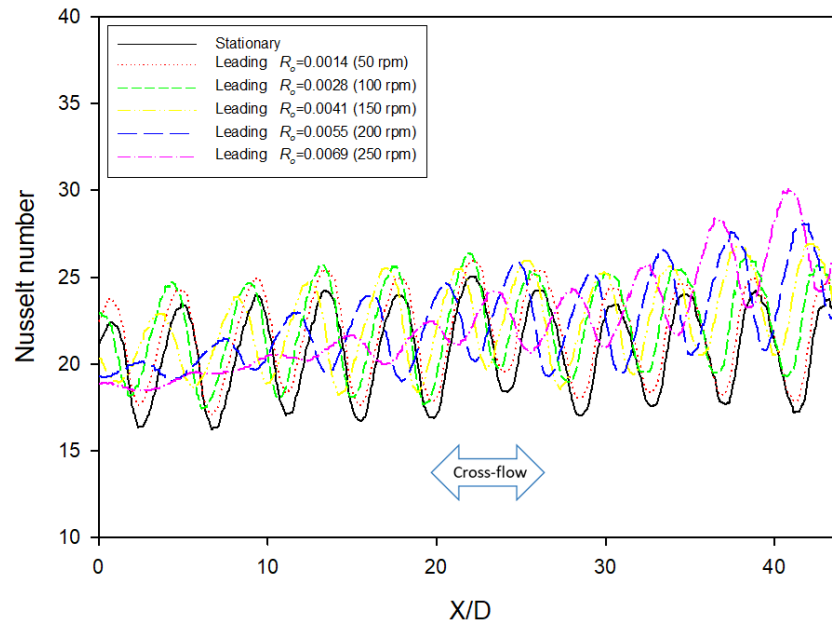
รูปที่ ก.12 คำนัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 6,000$)

H=4D Re=6000

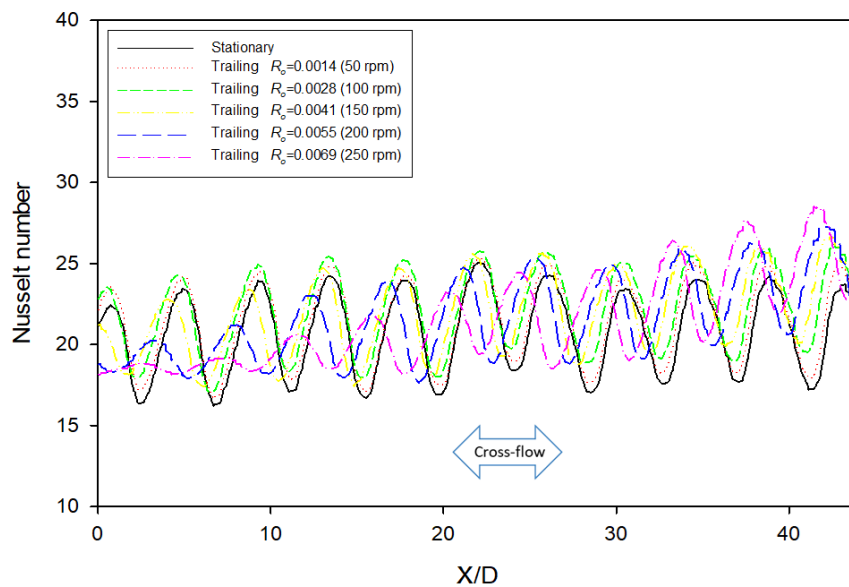
Two-way exits



รูปที่ ก.13 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=4D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 6,000)



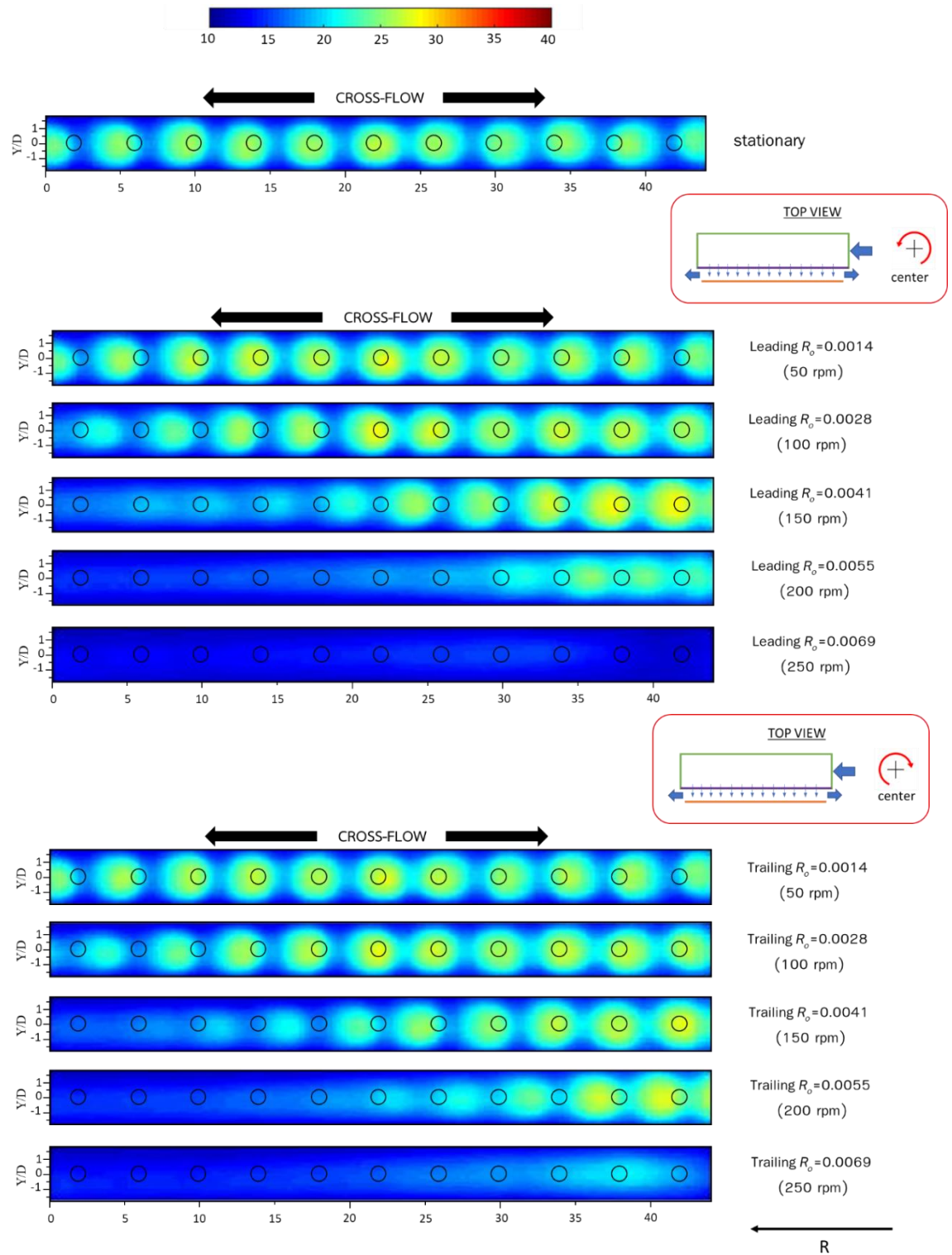
รูปที่ ก.14 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 6,000$)



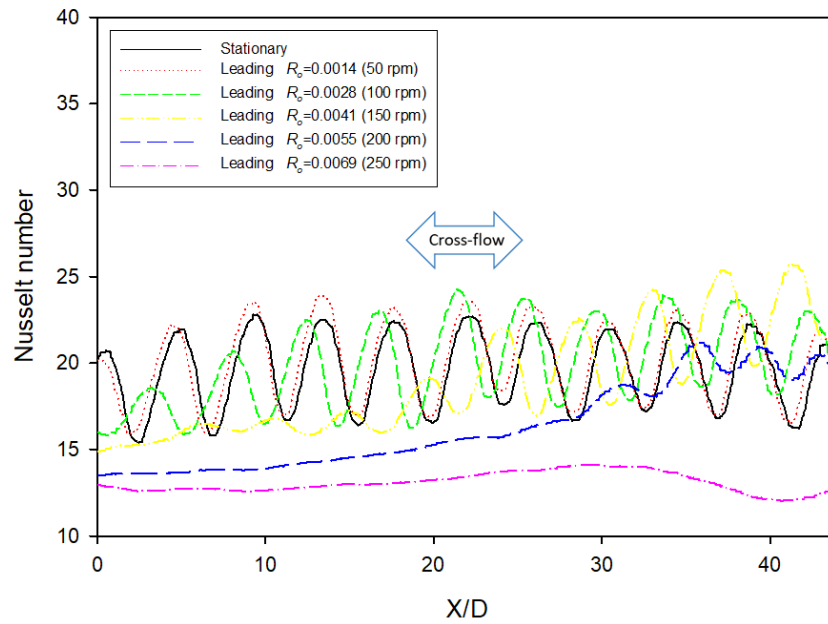
รูปที่ ก.15 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 6,000$)

H=6D Re=6000

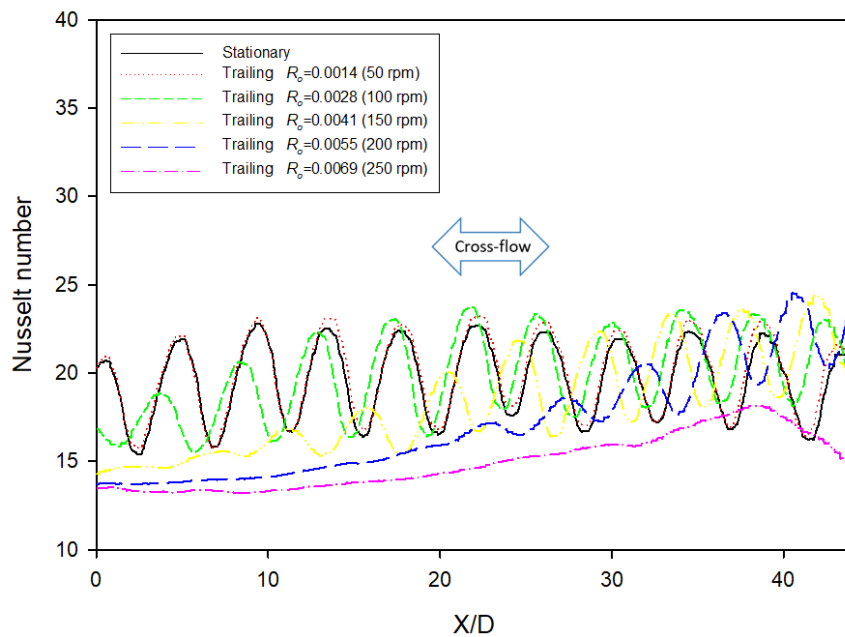
Two-way exits



รูปที่ ก.16 การกระจายของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 6,000)



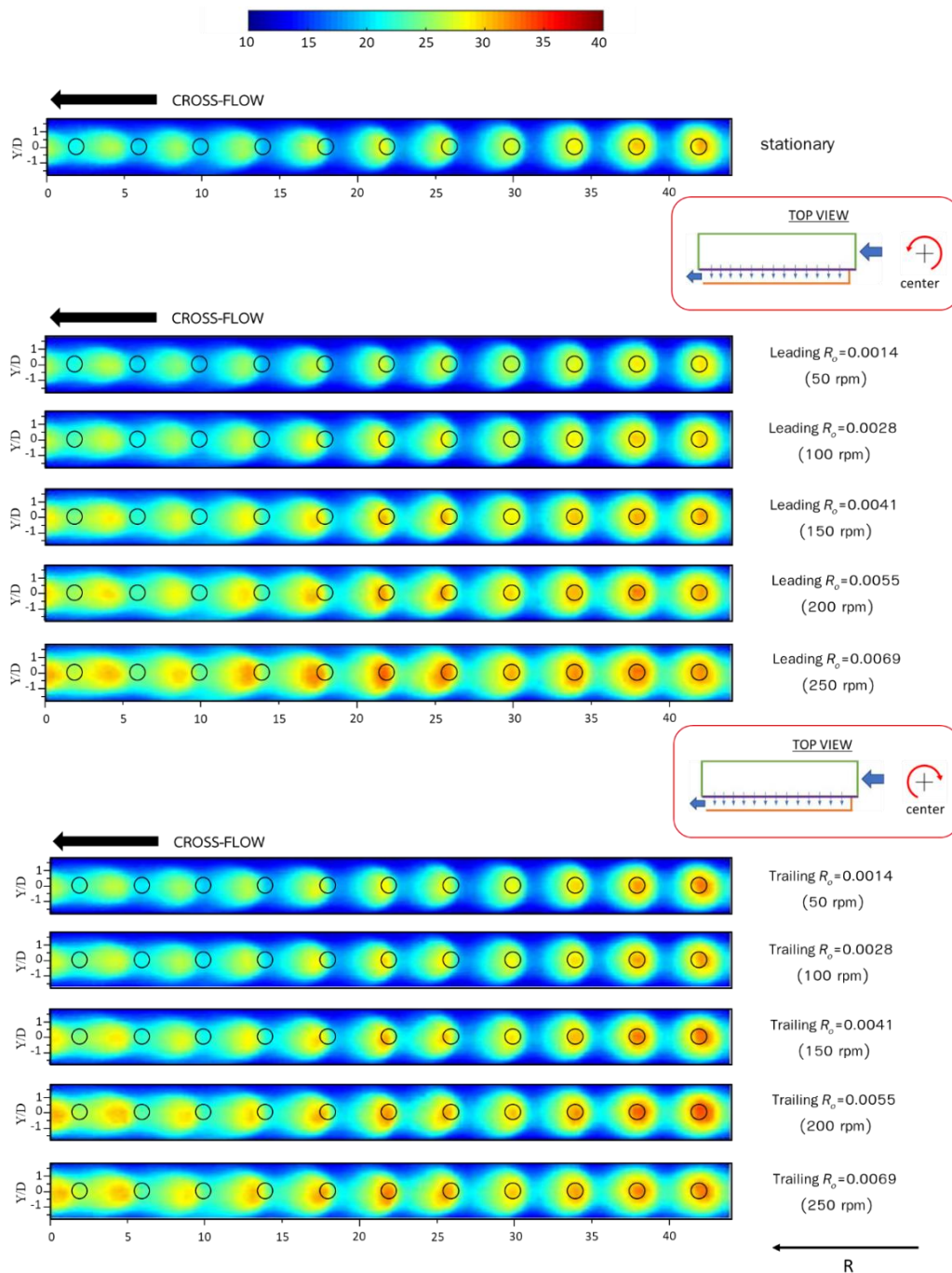
รูปที่ ก.17 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 6,000$)



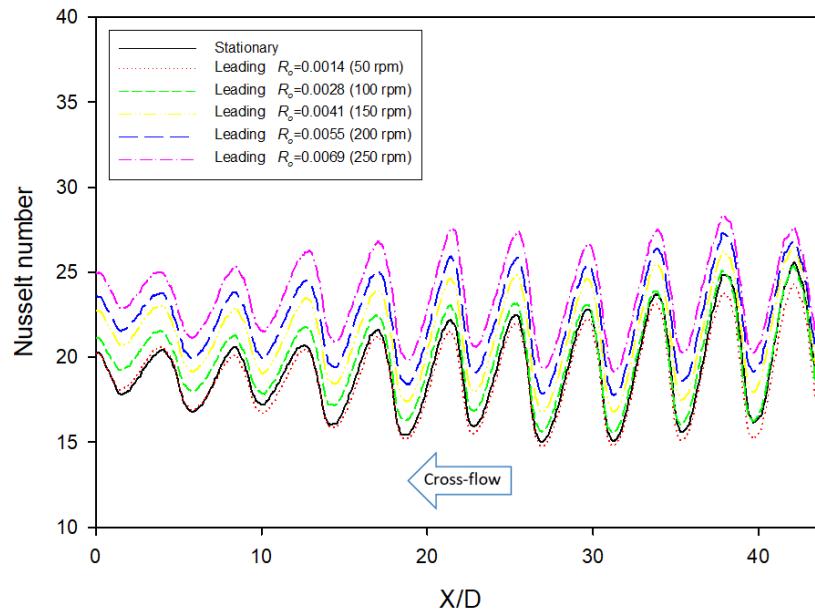
รูปที่ ก.18 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 6,000$)

H=2D Re=6000

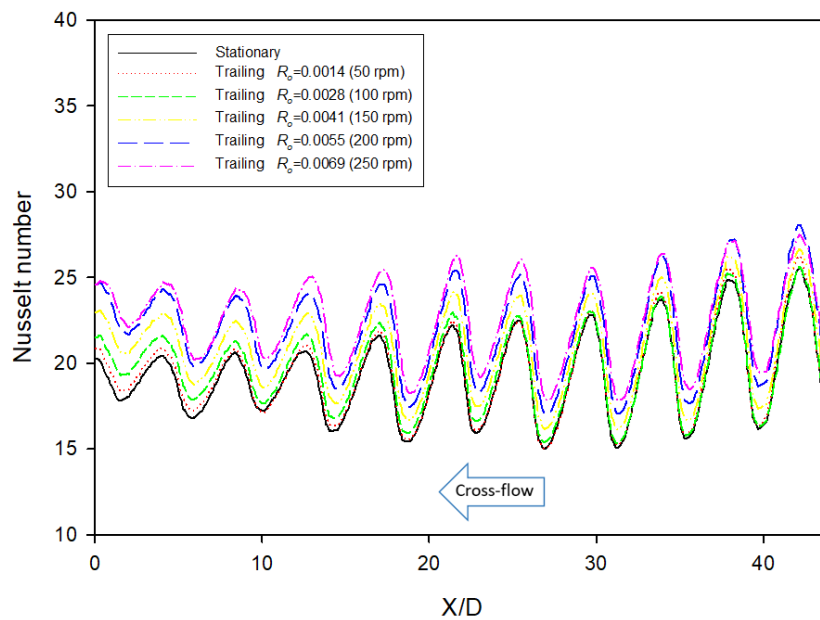
Single radius outward exit



รูปที่ ก.19 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 6,000)



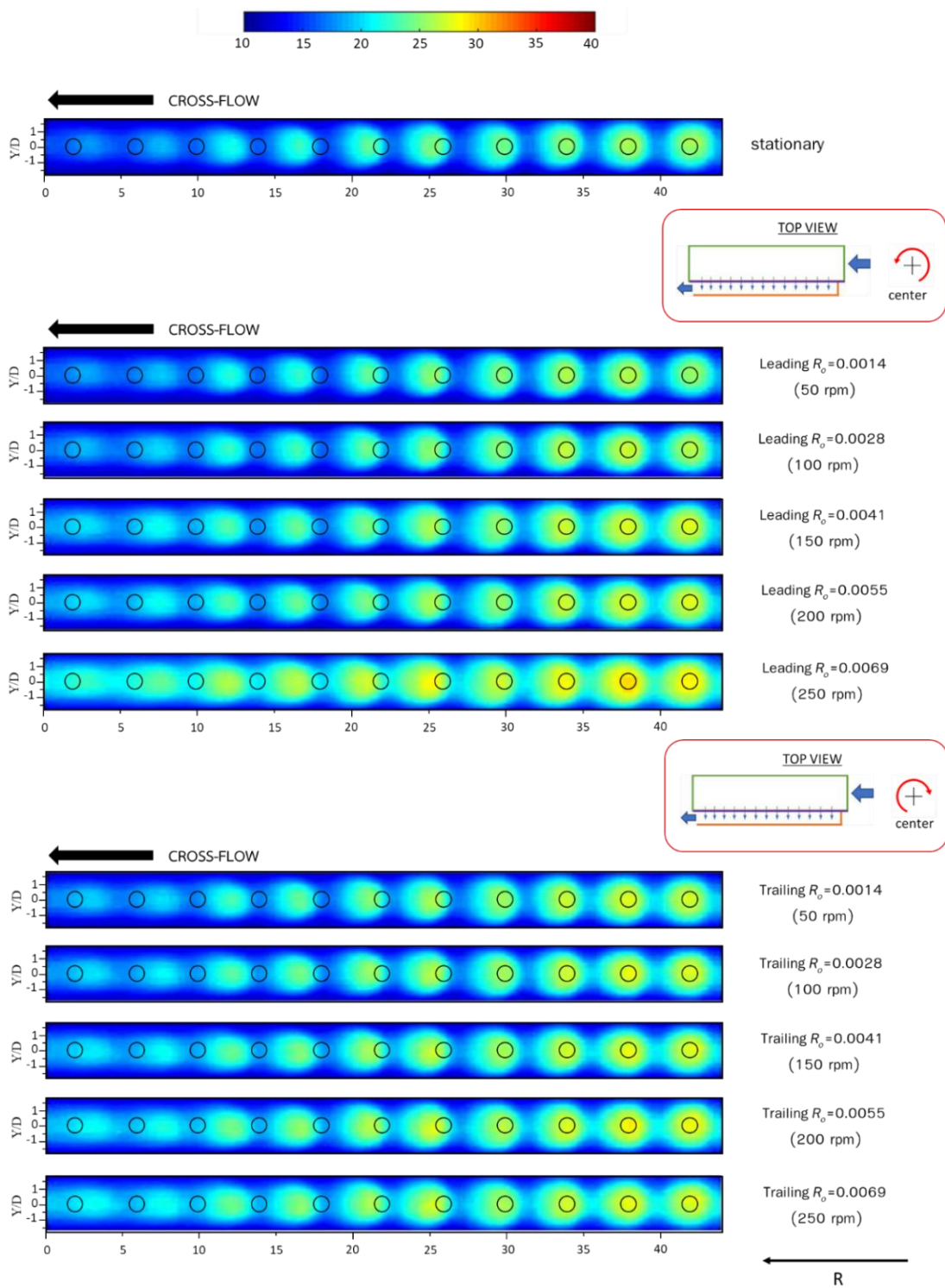
รูปที่ ก.20 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 6,000$)



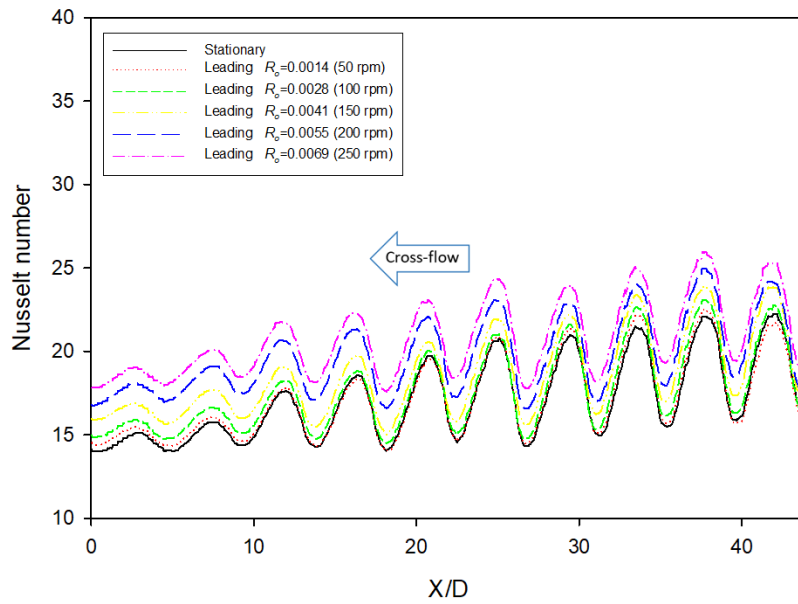
รูปที่ ก.21 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 6,000$)

H=4D Re=6000

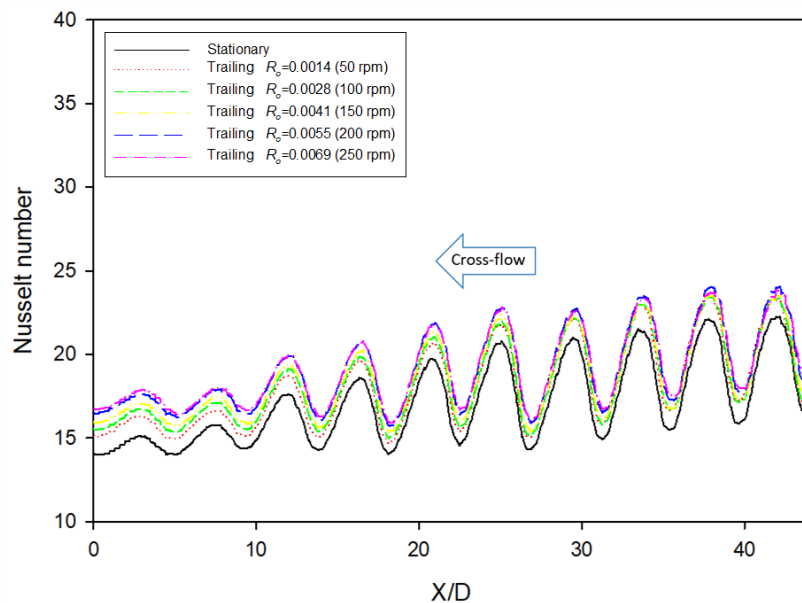
Single radius outward exit



รูปที่ ก.22 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=4D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 6,000)



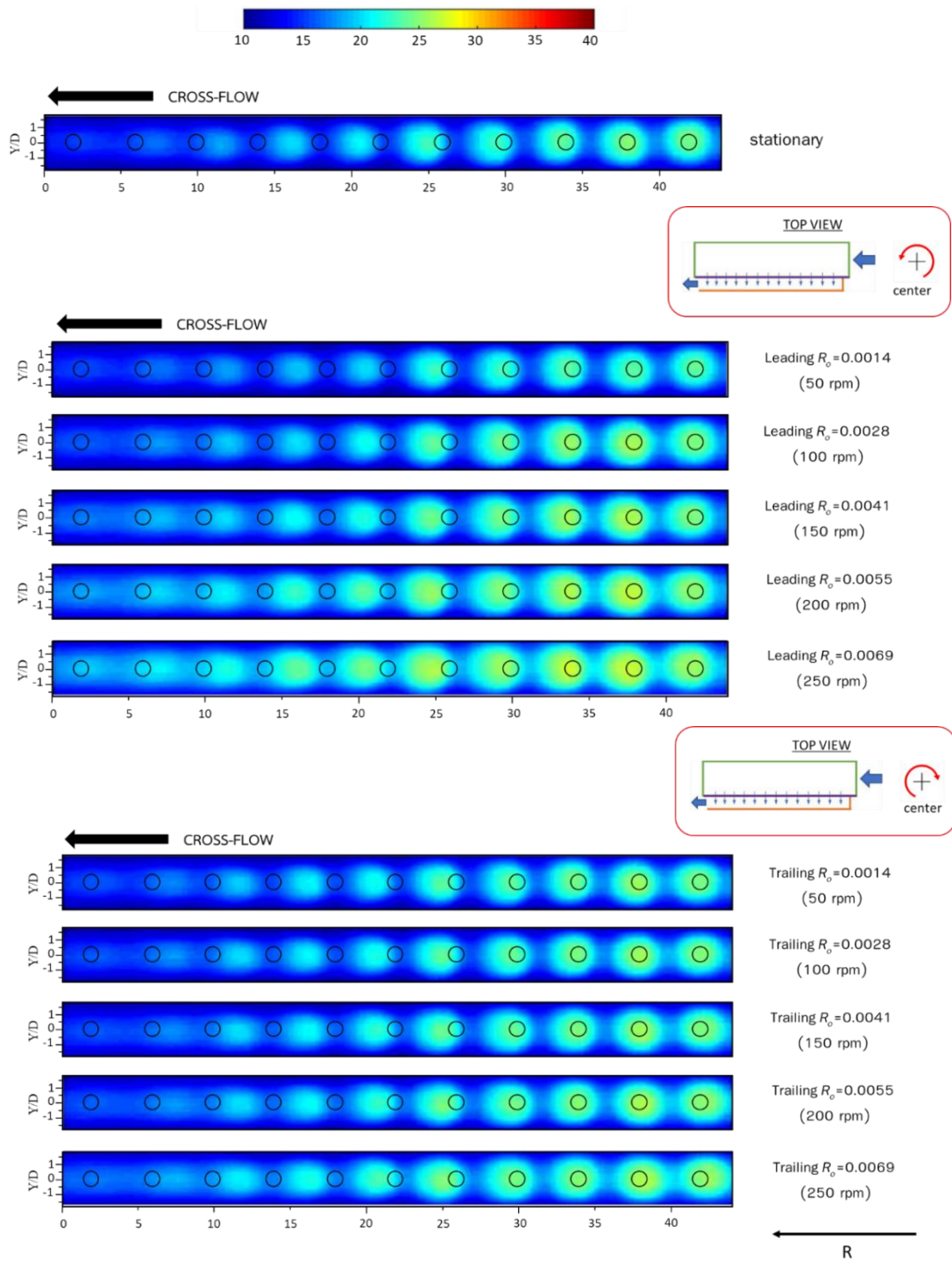
รูปที่ ก.23 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 6,000$)



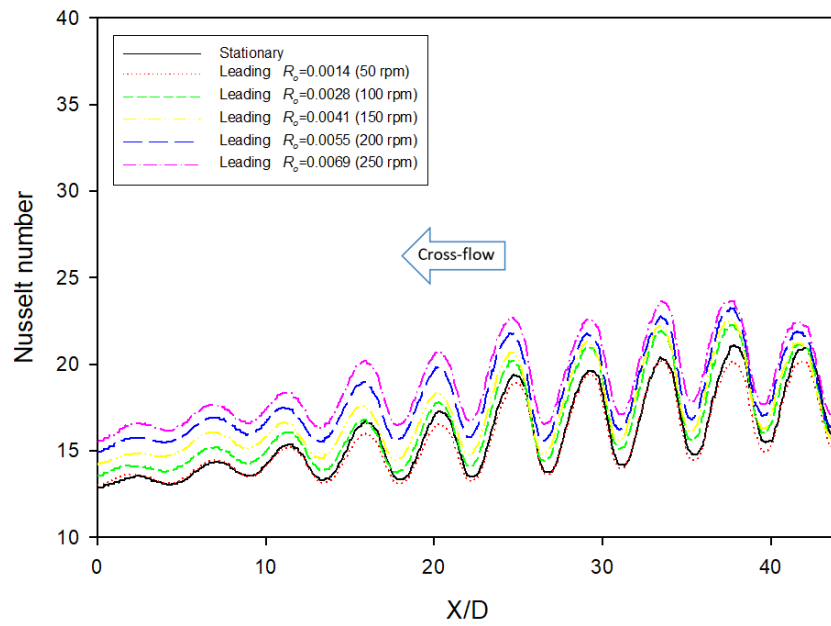
รูปที่ ก.24 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 6,000$)

H=6D Re=6000

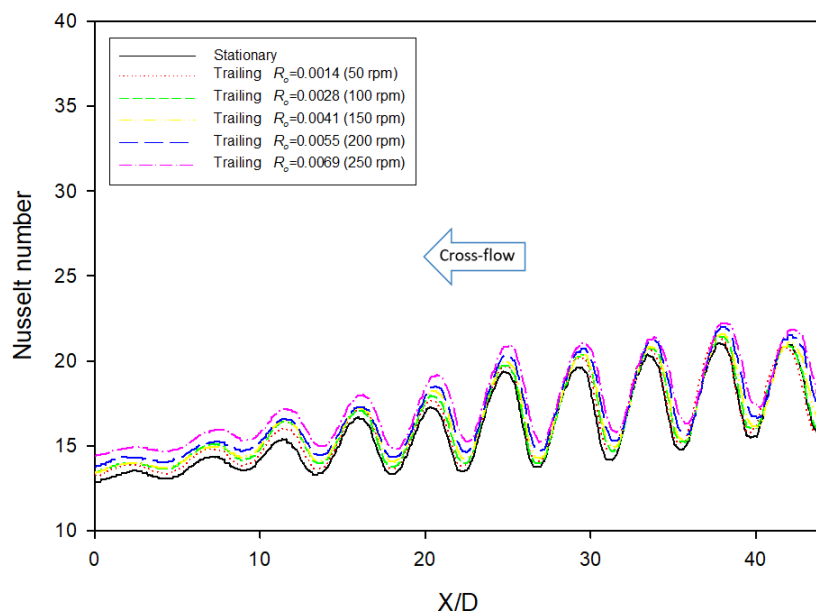
Single radius outward exit



รูปที่ ก.25 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 6,000)



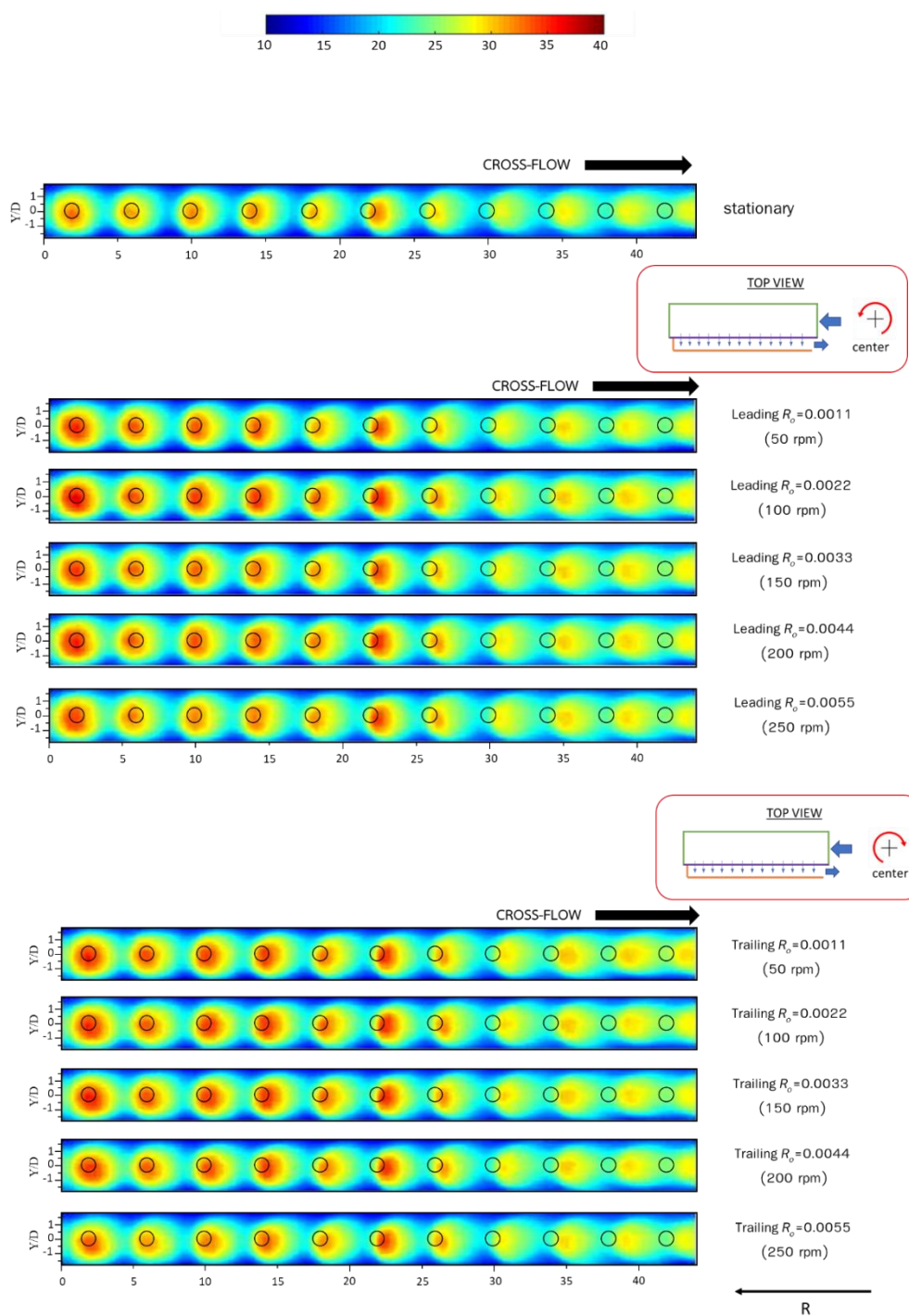
รูปที่ ก.26 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 6,000$)



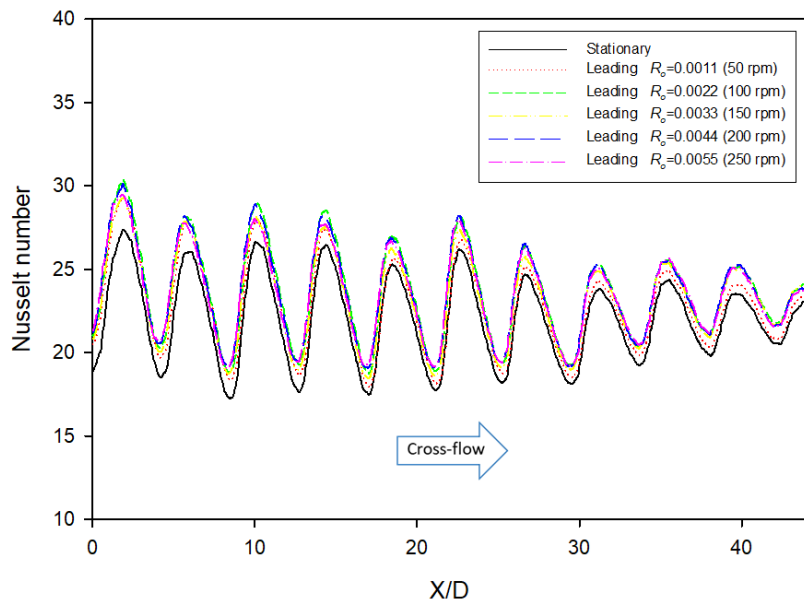
รูปที่ ก.27 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 6,000$)

H=2D Re=7500

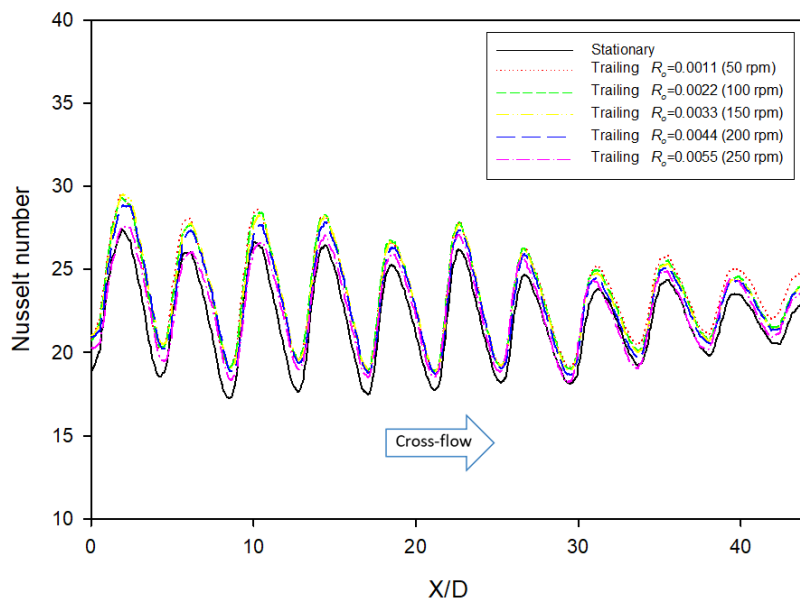
Single radius inward exit



รูปที่ ก.28 การกระจายของค่าน้ำสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 7,500)



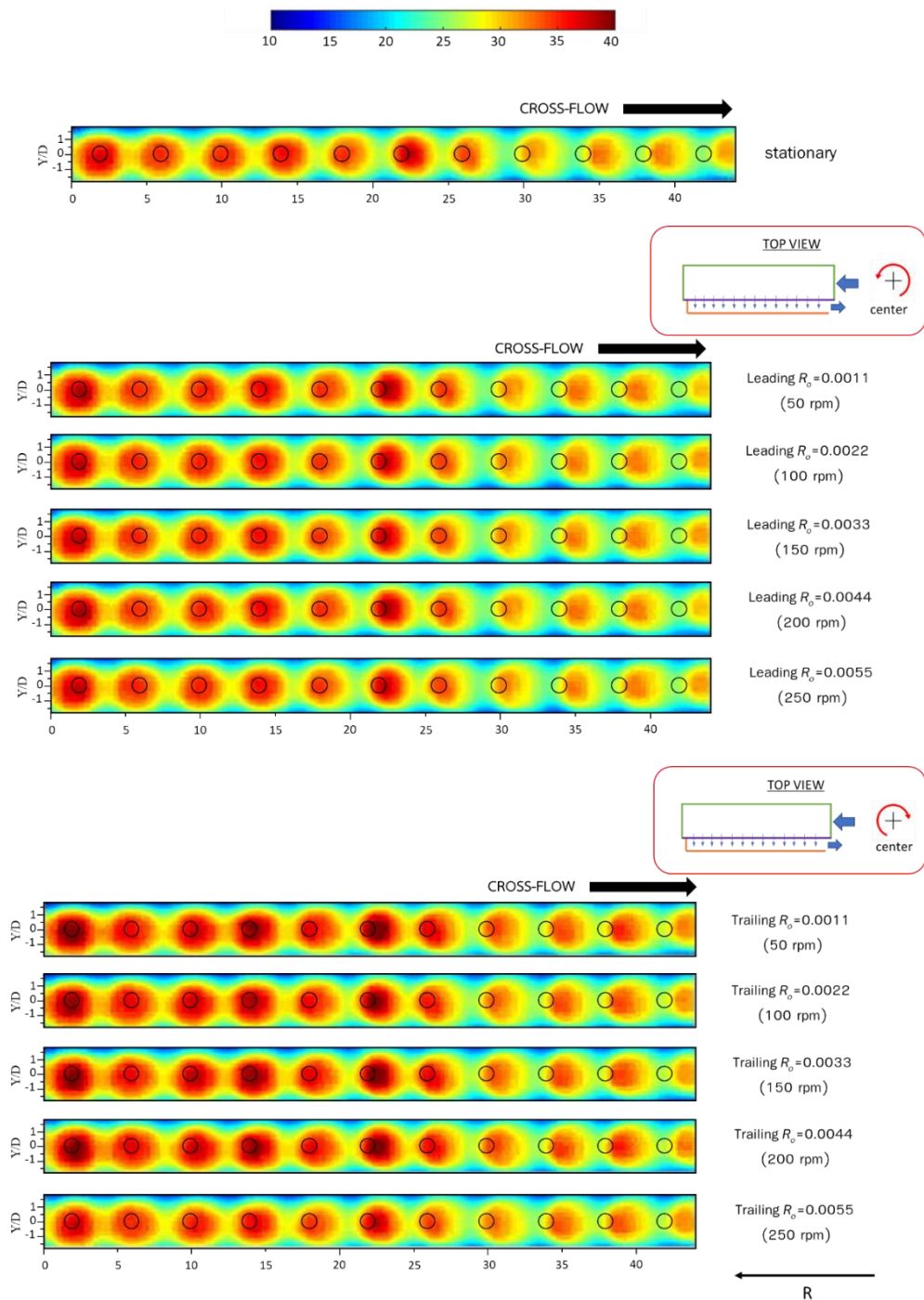
รูปที่ ก.29 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 7,500$)



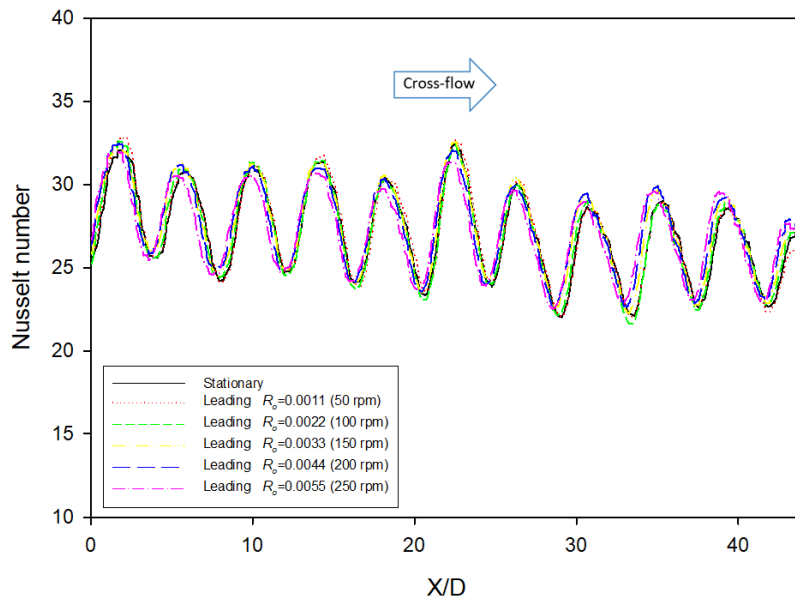
รูปที่ ก.30 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 7,500$)

$H=4D$ $Re=7500$

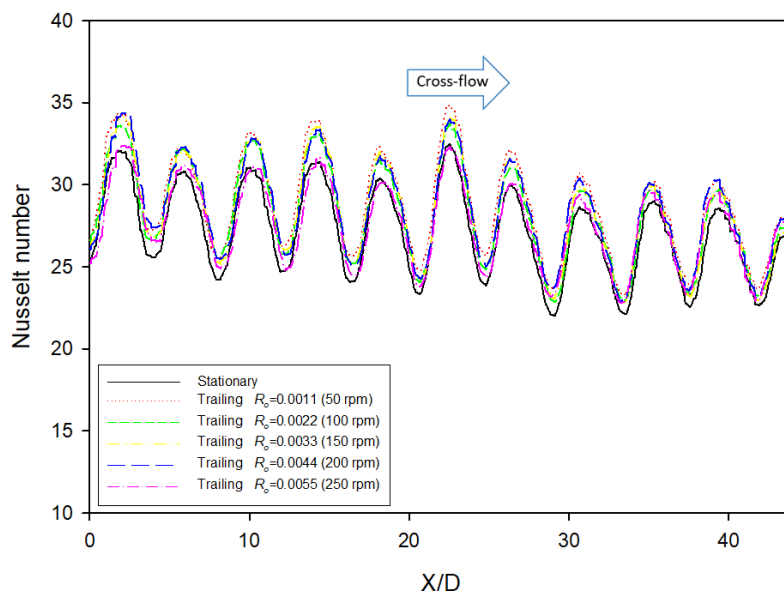
Single radius inward exit



รูปที่ ก.31 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 7,500$)



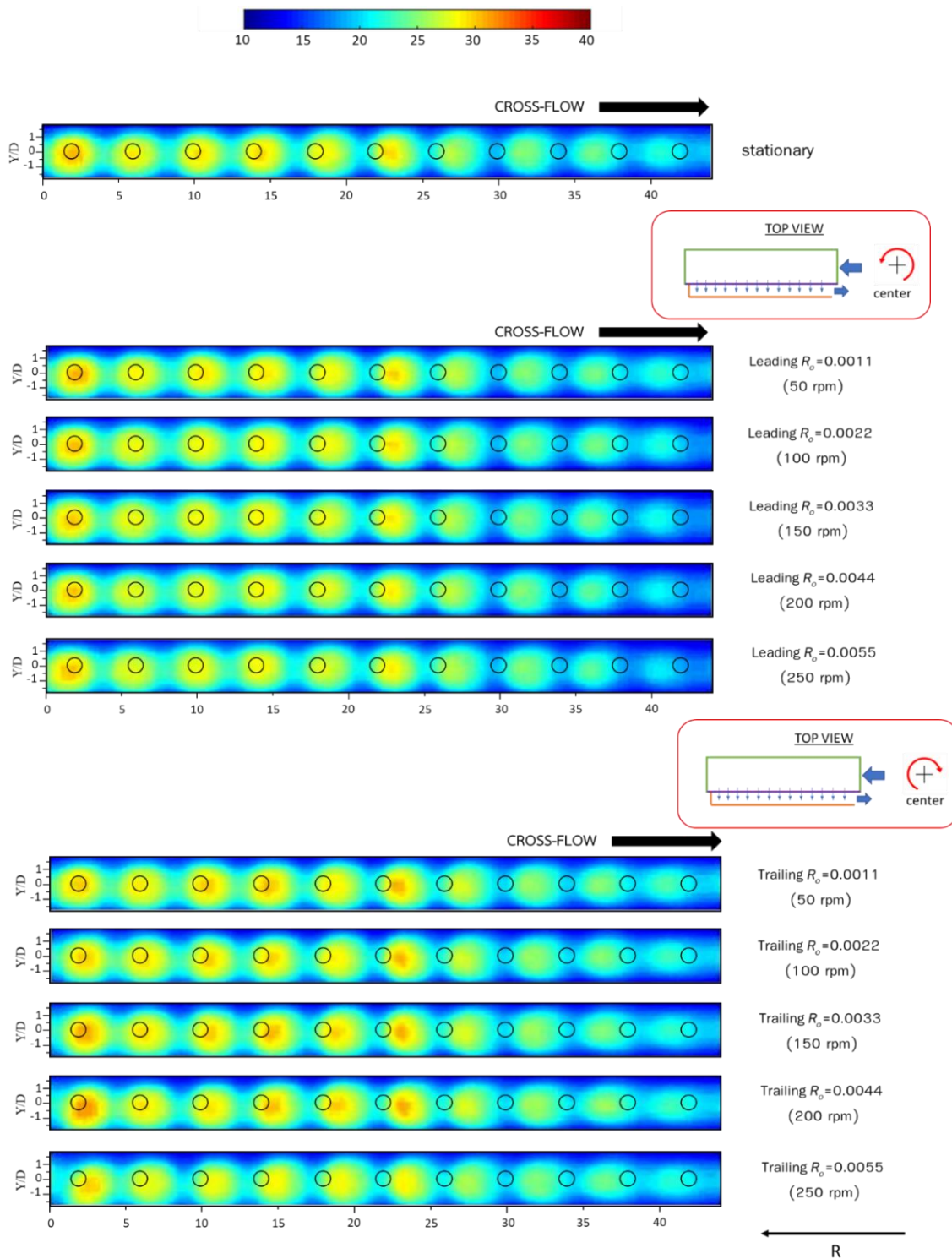
รูปที่ ก.32 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 7,500$)



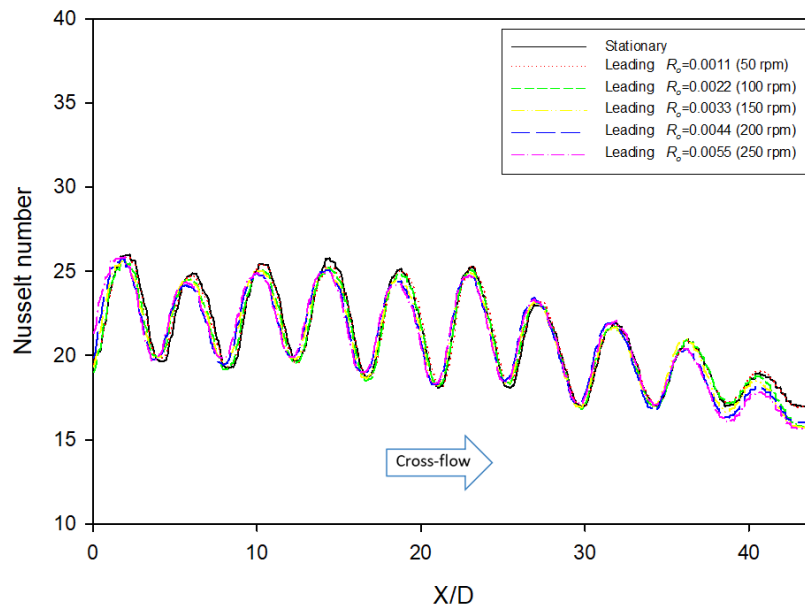
รูปที่ ก.33 ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 7,500$)

H=6D Re=7500

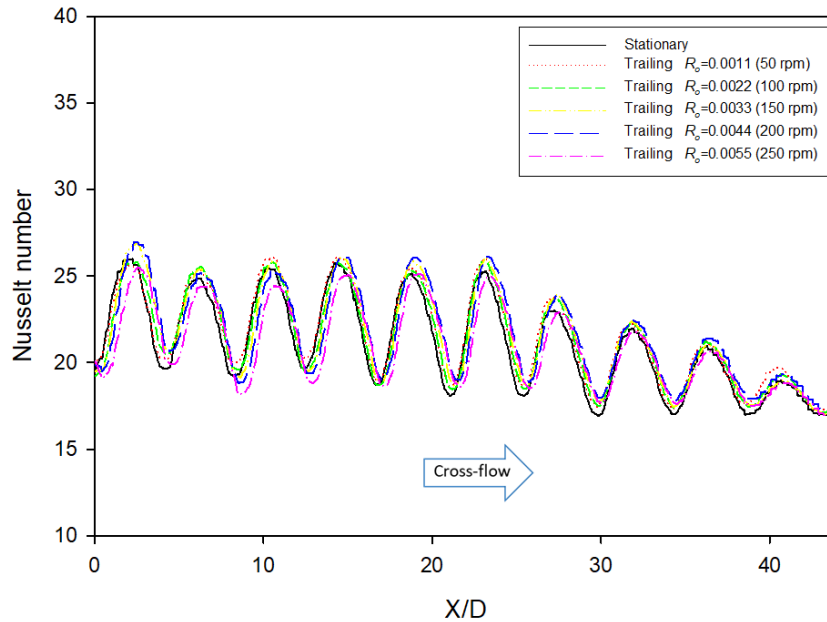
Single radius inward exit



รูปที่ ก.34 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius inward exit (Re = 7,500)



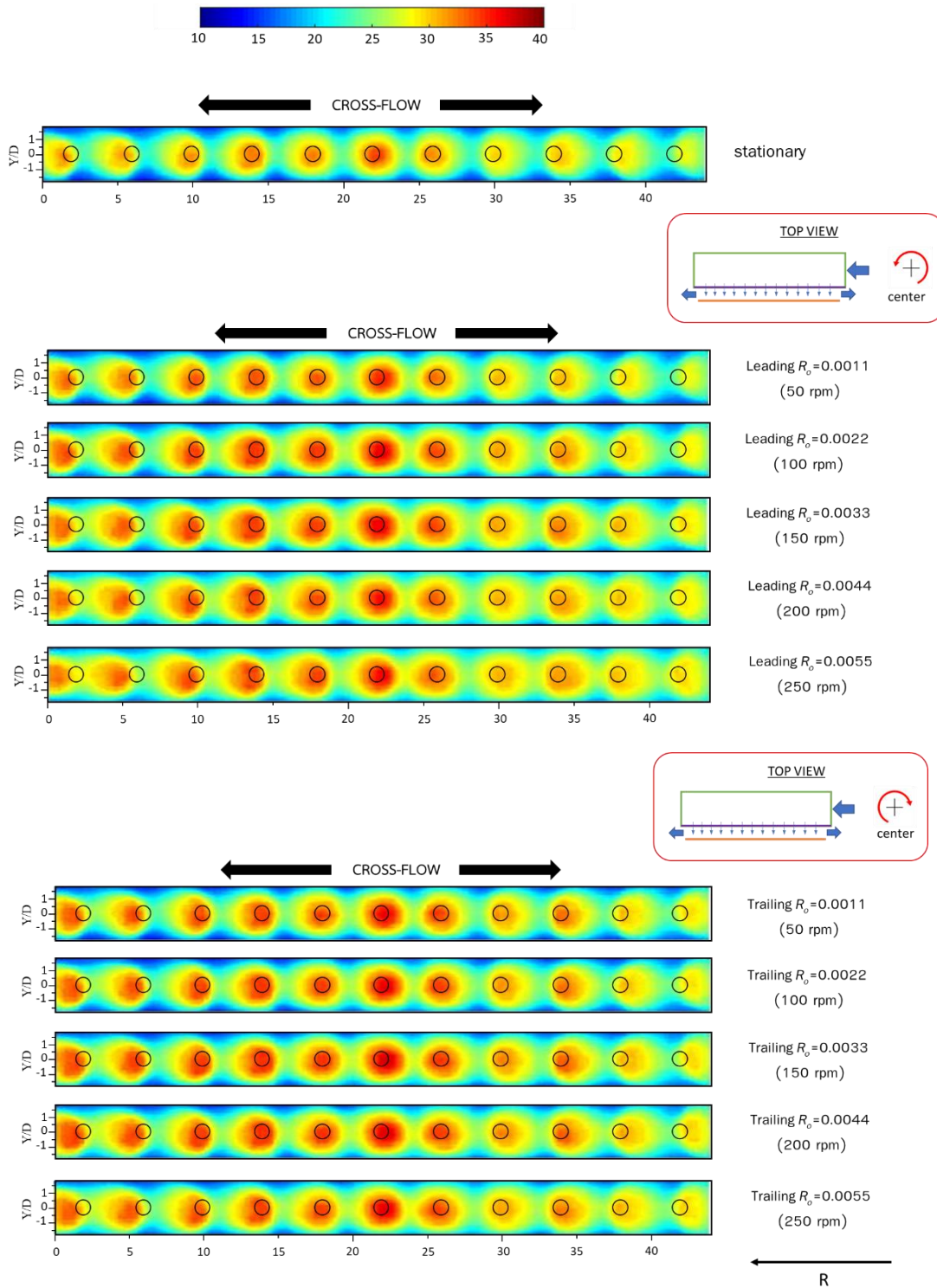
รูปที่ ก.35 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 7,500$)



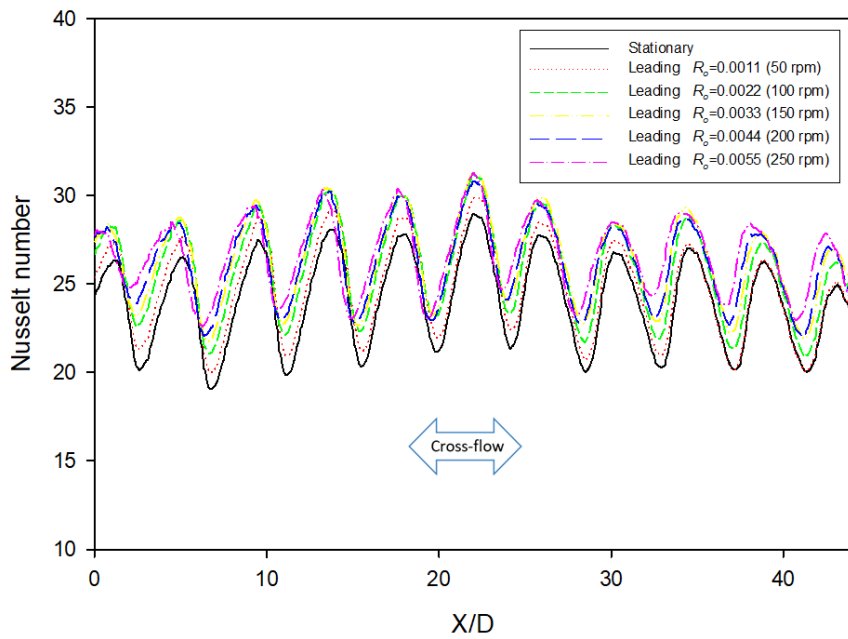
รูปที่ ก.36 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius inward exit ($Re = 7,500$)

H=2D Re=7500

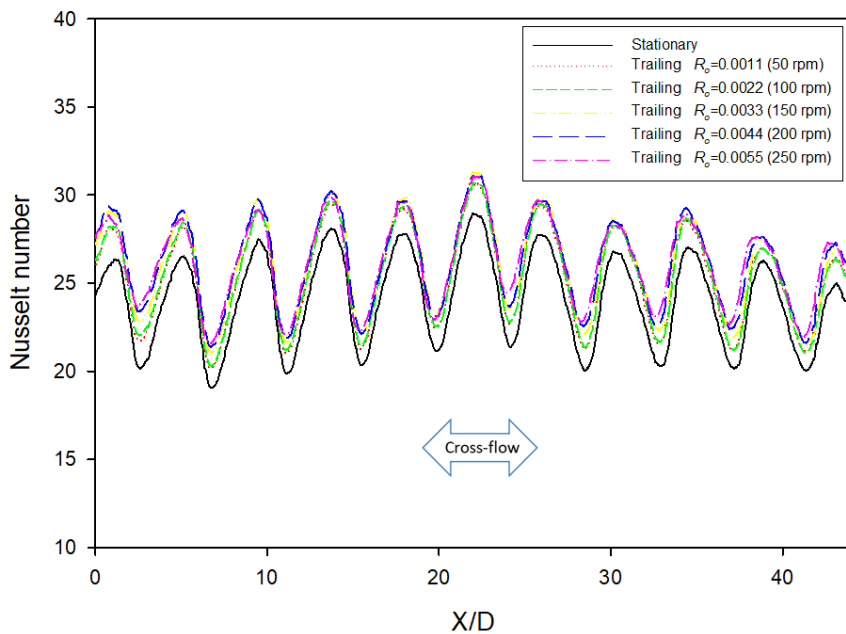
Two-way exits



รูปที่ ก.37 การกระจายของค่าน้ำสเกลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=2D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 7,500)



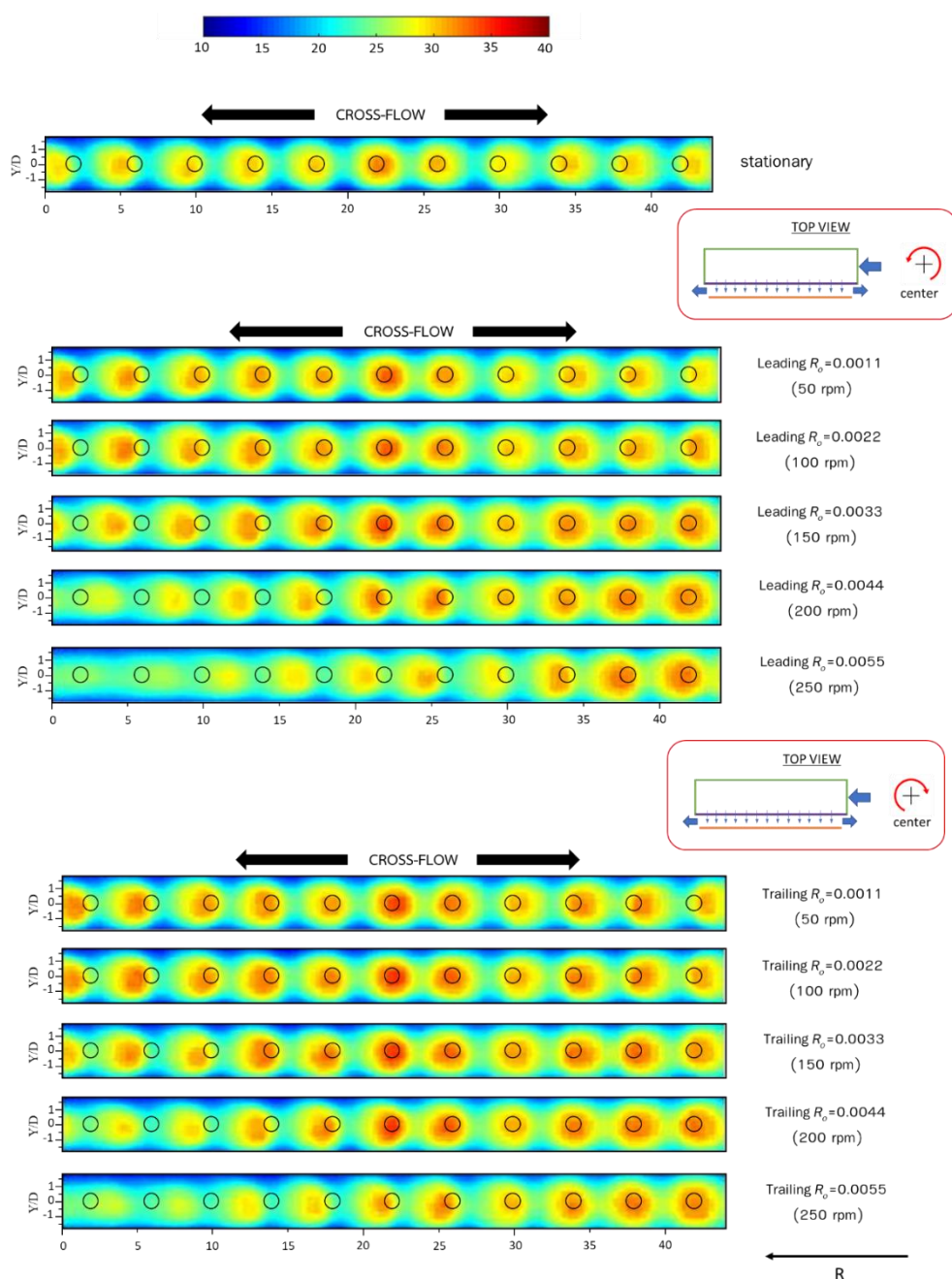
รูปที่ ก.38 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 7,500$)



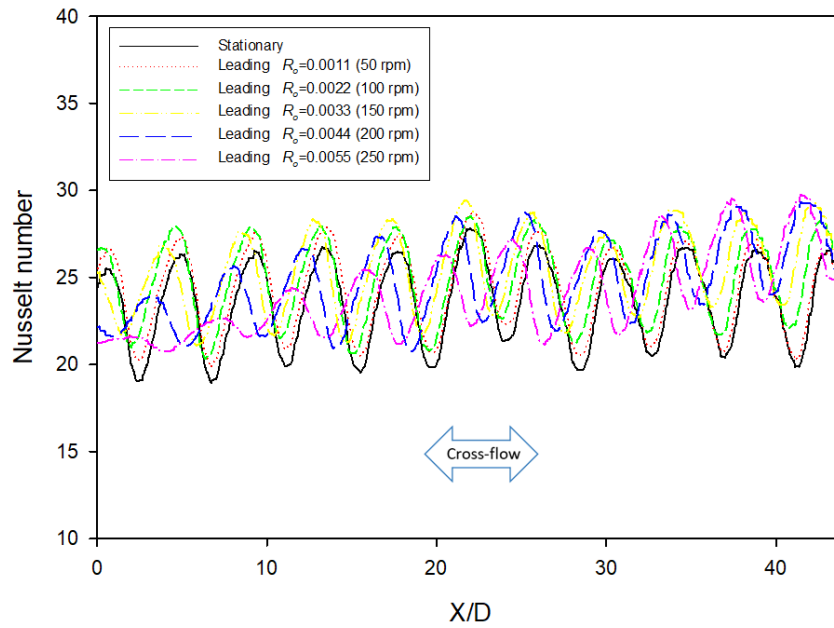
รูปที่ ก.39 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 7,500$)

H=4D Re=7500

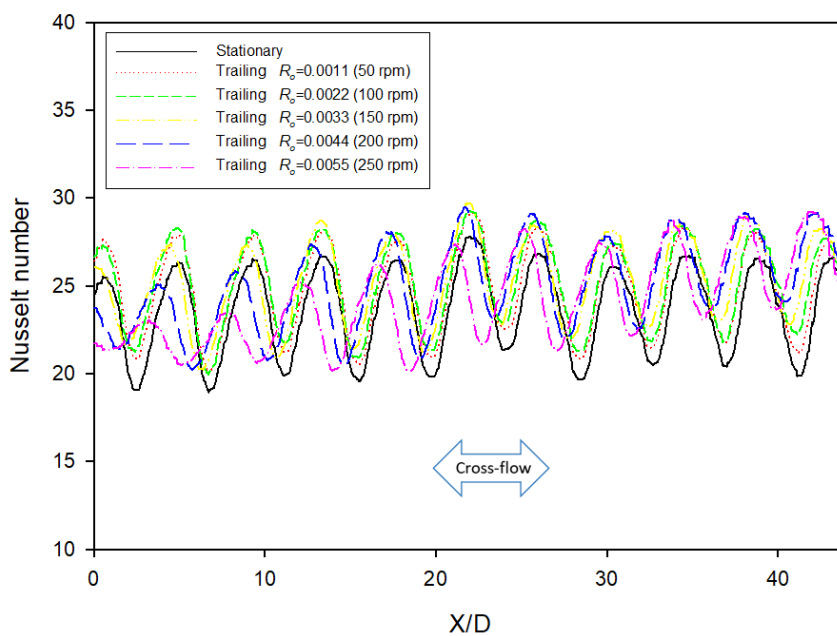
Two-way exits



รูปที่ ก.40 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=4D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 7,500)



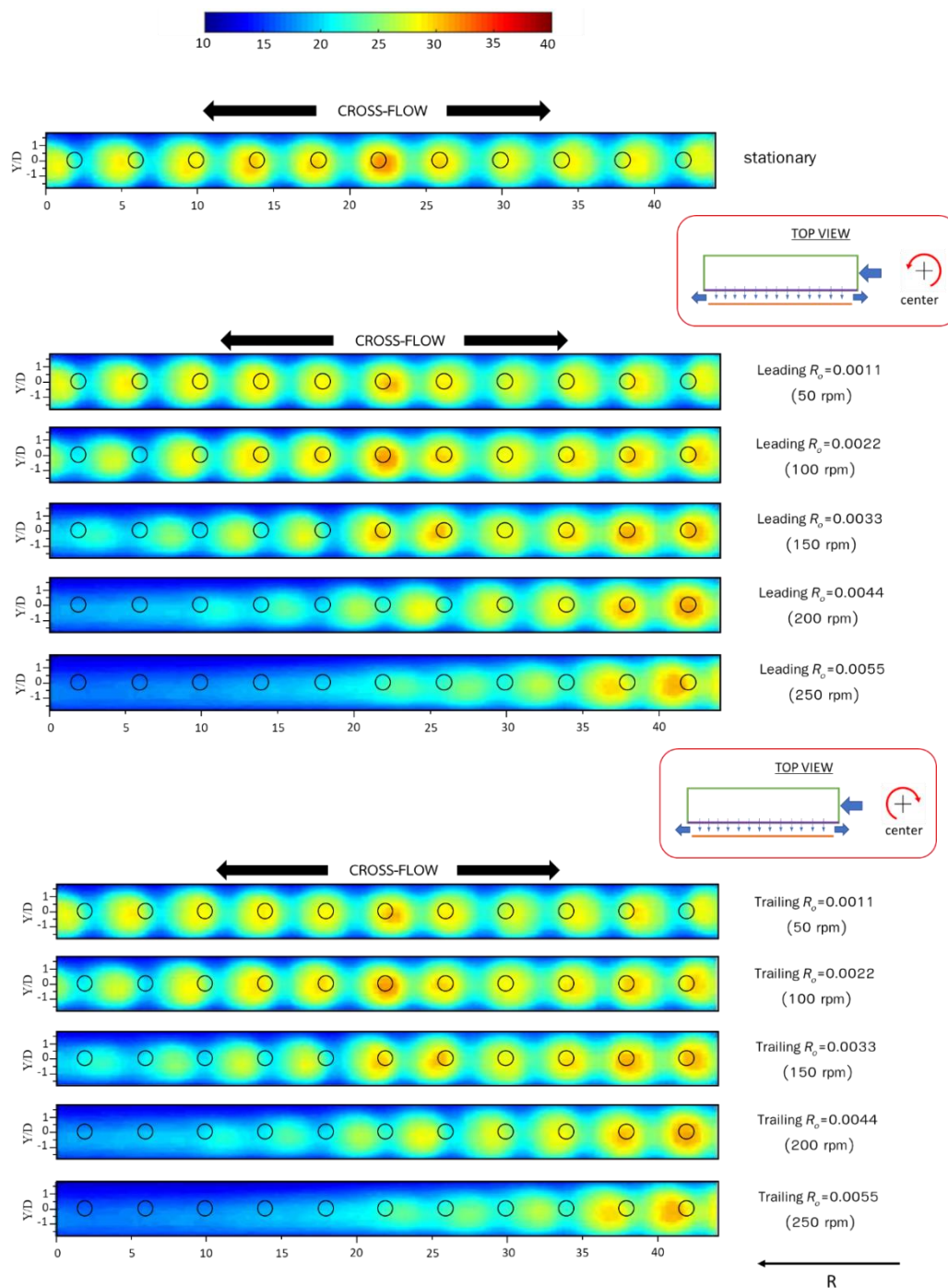
รูปที่ ก.41 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 7,500$)



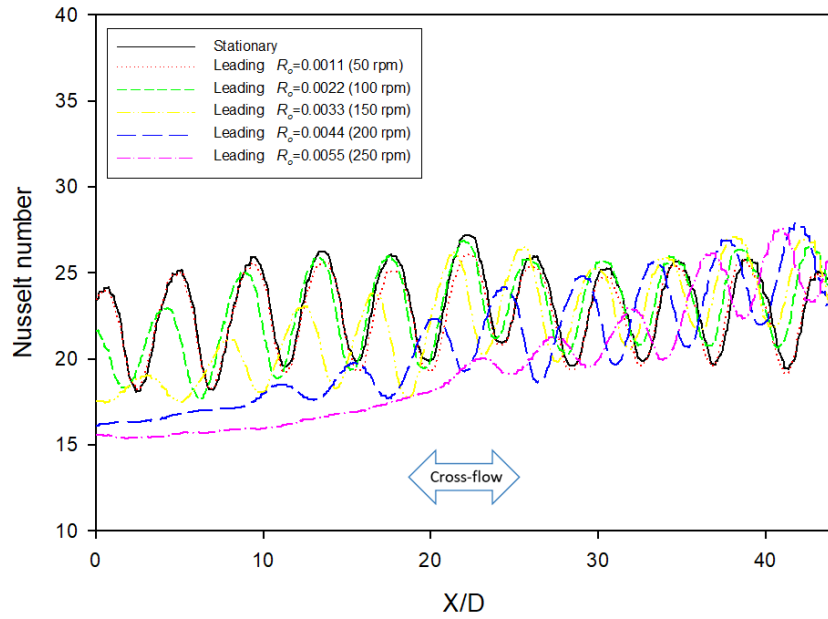
รูปที่ ก.42 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 7,500$)

H=6D Re=7500

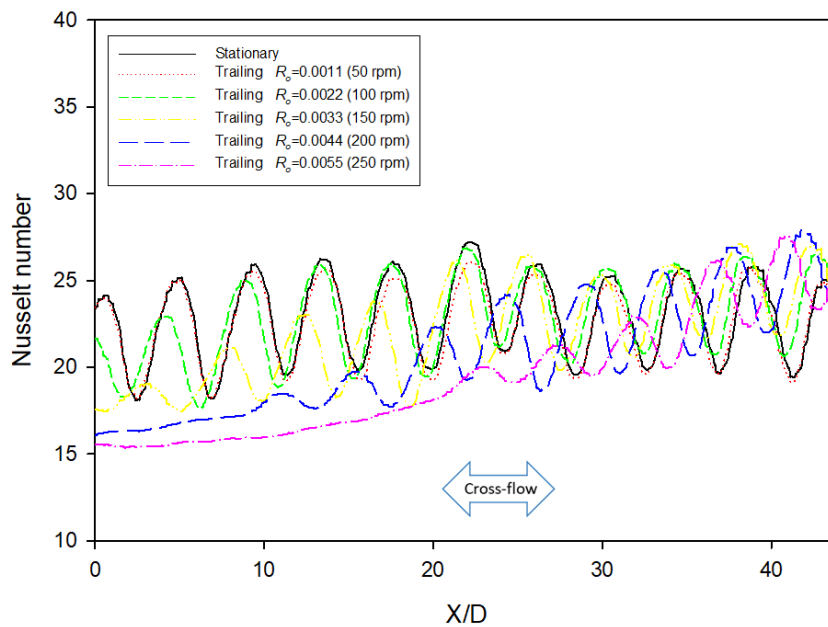
Two-way exits



รูปที่ ก.43 การกระจายของค่านัสเซลล์ต้นมีเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=6D รูปแบบทางออก Two-way exits (Re = 7,500)



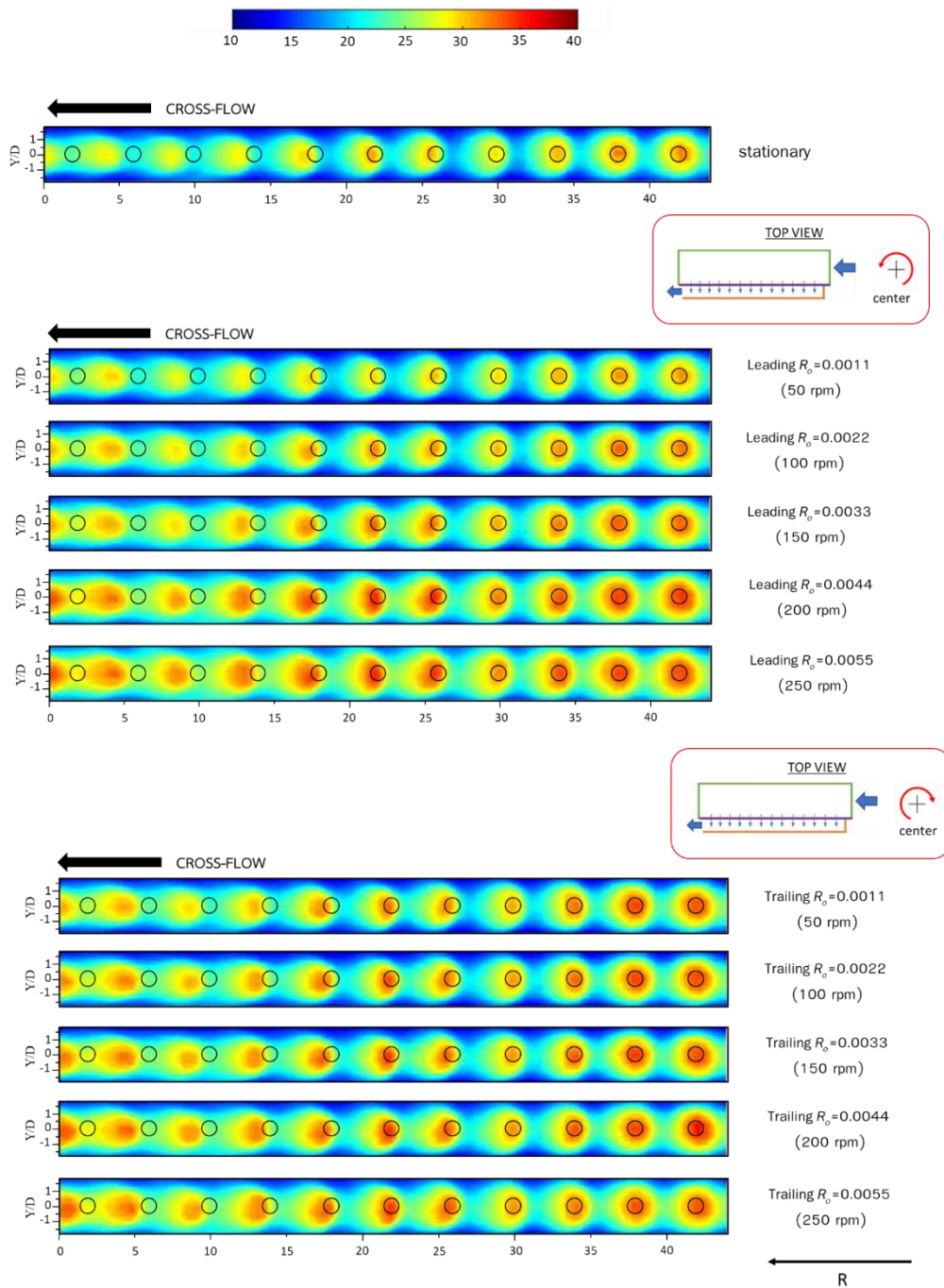
รูปที่ ก.44 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 7,500$)



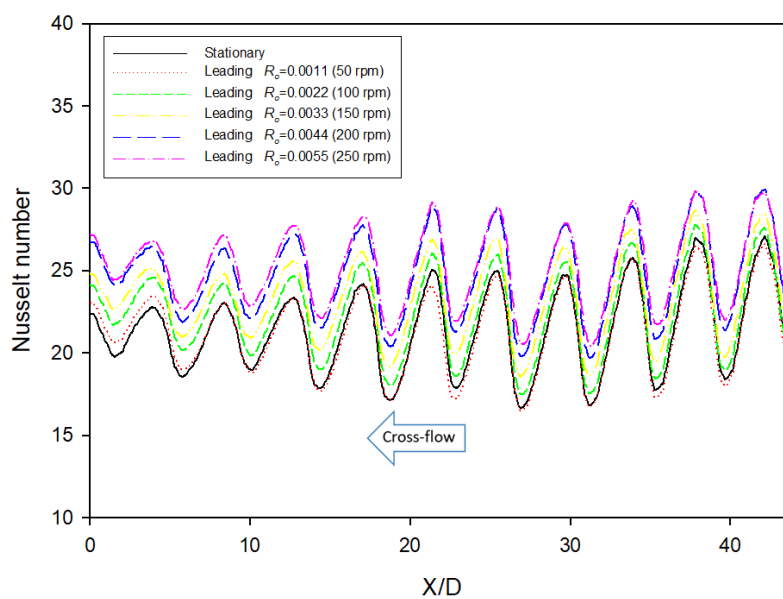
รูปที่ ก.45 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุงชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Two-way exits ($Re = 7,500$)

H=2D Re=7500

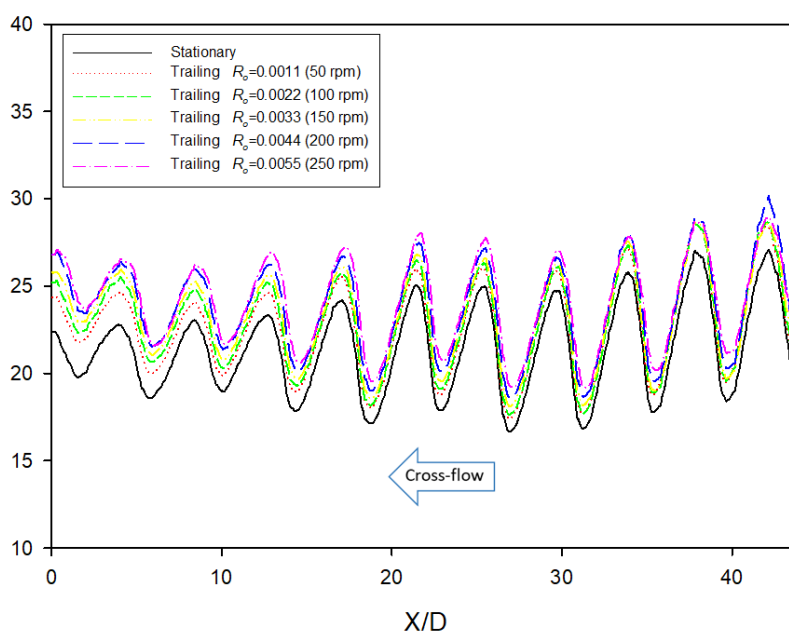
Single radius outward exit



รูปที่ ก.46 การกระจายของค่าสเกลิตันัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=2D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 7,500)



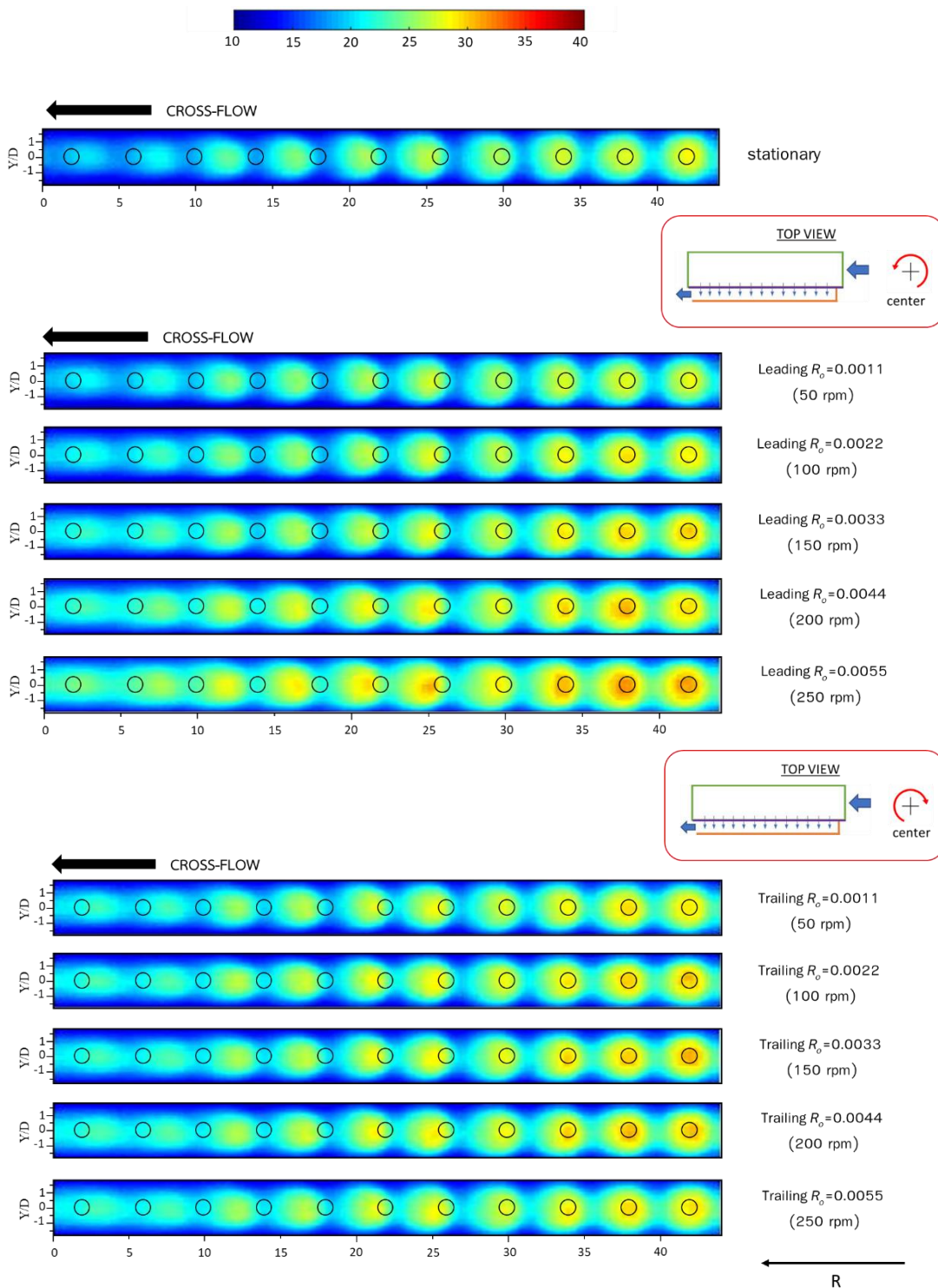
รูปที่ ก.47 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 7,500$)



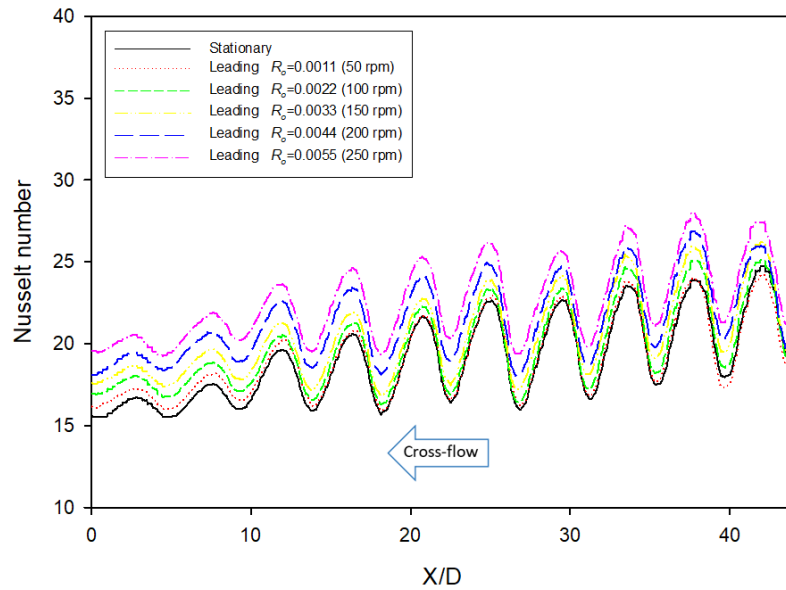
รูปที่ ก.48 ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะฟุ้งชน $H=2D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 7,500$)

H=4D Re=7500

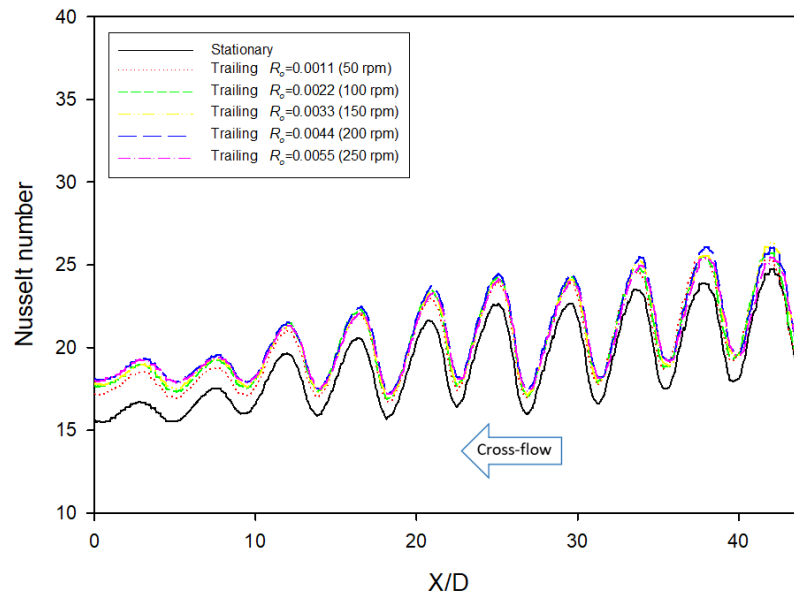
Single radius outward exit



รูปที่ ก.49 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะฟุ้งชน H=4D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 7,500)



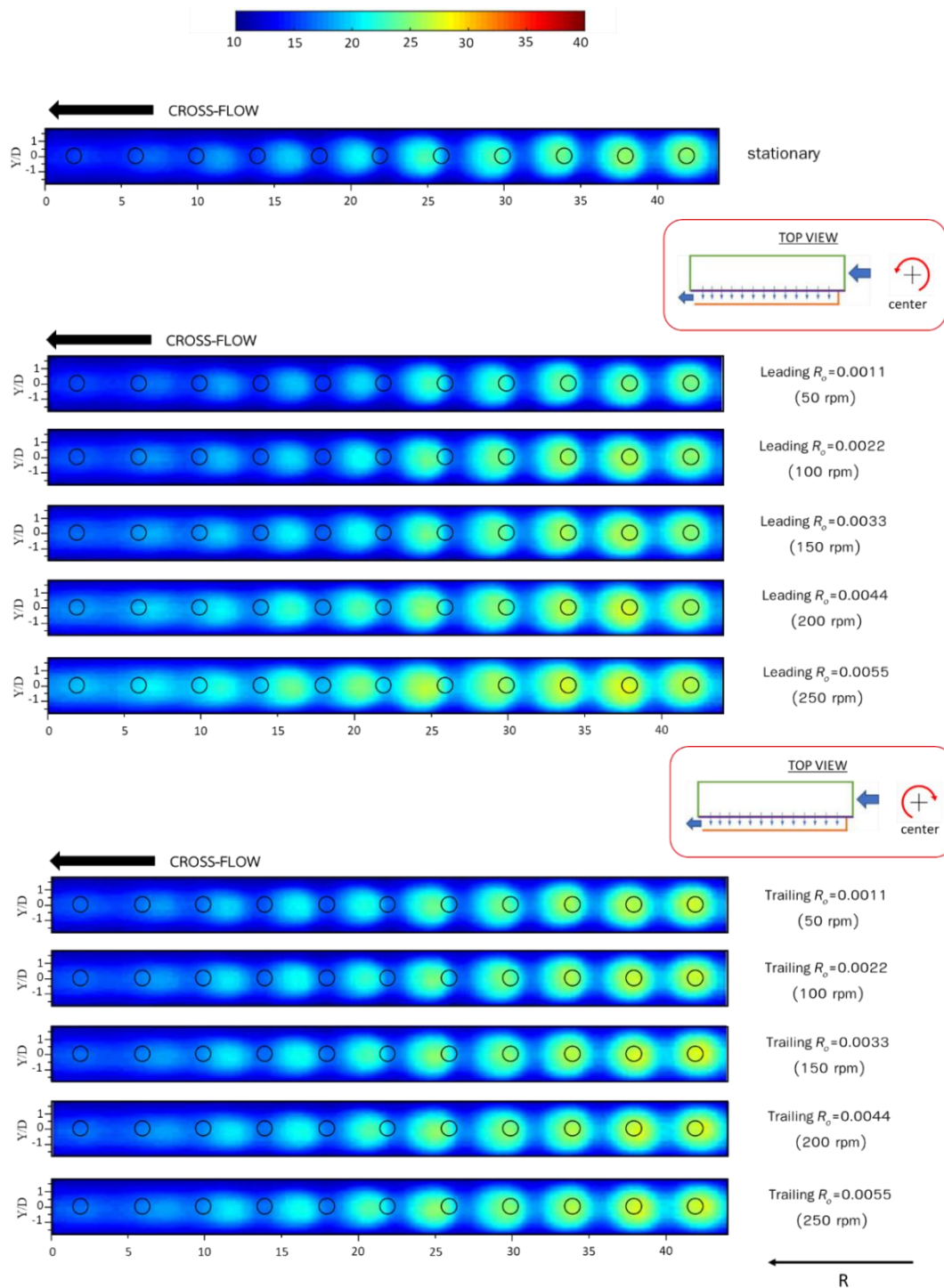
รูปที่ ก.50 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 7,500$)



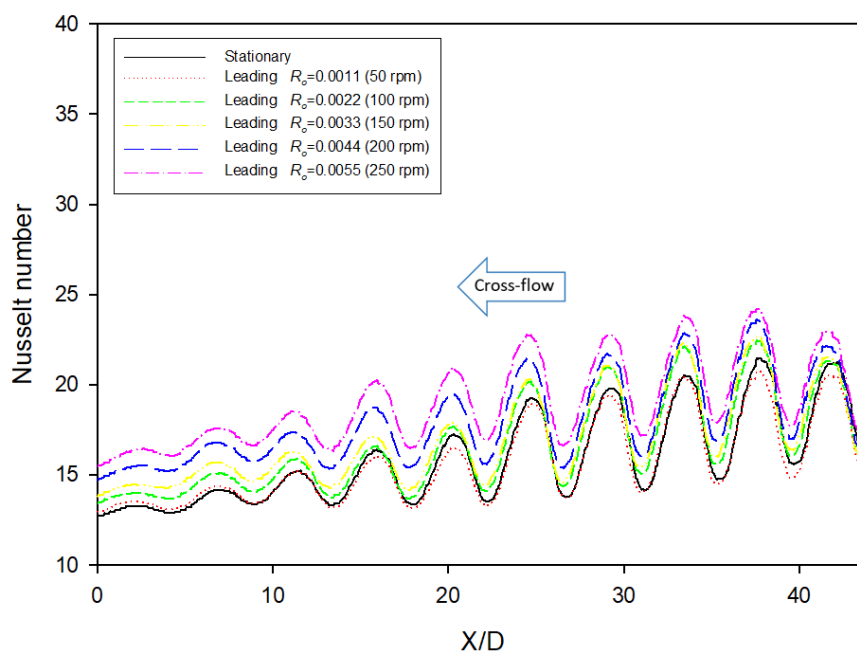
รูปที่ ก.51 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=4D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 7,500$)

H=6D Re=7500

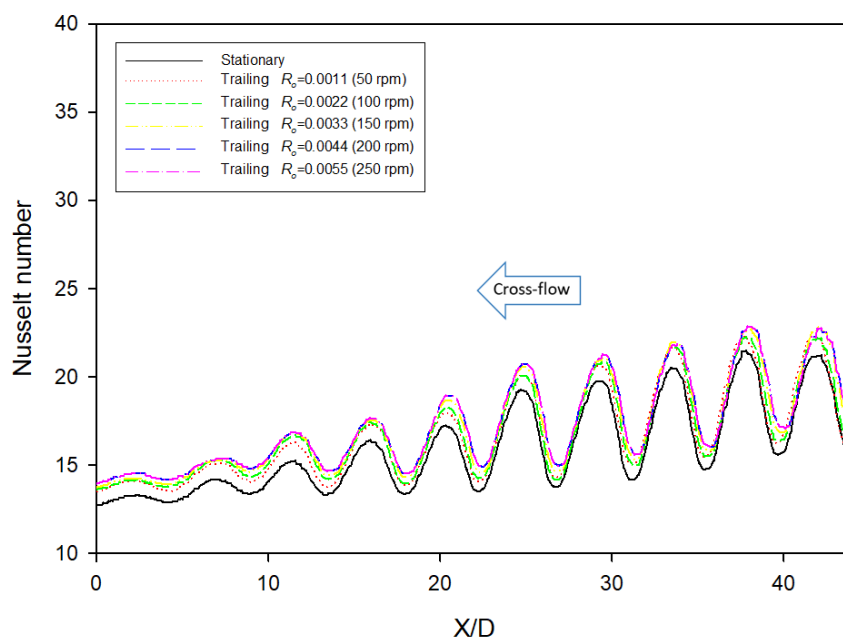
Single radius outward exit



รูปที่ ก.52 การกระจายของค่านัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน H=6D รูปแบบทางออก Single radius outward exit (Re = 7,500)



รูปที่ ก.53 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Leading กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 7,500$)



รูปที่ ก.54 คำนวณเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน Y ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะพุ่งชน $H=6D$ เปรียบเทียบผนังด้าน Trailing กับ กรณีหยุดนิ่ง รูปแบบทางออก Single radius outward exit ($Re = 7,500$)

ภาคผนวก ข. การคำนวณหาความไม่แน่นอนของผลลัพธ์จากการวัดการถ่ายเทความร้อน

Uncertainties of Nusselt number by using TLC method (30-35 °C)

$$\frac{\delta y}{y} = \left[\left(\frac{\delta y}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\partial x_3} \delta x_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta y}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{0.5}$$

Table 1 Uncertainties of measured parameters

No.	Parameters	Symbol	Instrument	Uncertainty
1	Stainless surface area			
	Width	W	Linear scale	± 1.00 mm
	Length	L	Linear scale	± 1.00 mm
2	Diameter of pipe jet	D	Digital vernier caliper	± 0.01 mm
3	Temperature distribution on surface	-	TLC sheet	± 0.2 °C
4	Temperature measurement	-	K-type thermocouple	± 0.1 °C
5	Rotational speed	N	Encoder (E3FJ-R2C2)	± 2 rpm
6	Flow rate	Q	Air flow meter (FLOWTECH KF600-50)	± 0.025 rpm
7	Electrical current	I	DC power supply	± 0.1 A
8	Voltage	V	Digital voltmeter	± 0.005 V

To find the Nusselt number (Nu)

- Area of stainless surface

$$A = W \times L \tag{1.1}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{1}{90} \right)^2 + \left(\frac{1}{280} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = 0.0116709 \text{ or } 1.1671\%$$

- Input heat flux (\dot{q}_{input})

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (1.2)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{input}}{\dot{q}_{input}} = \left[\left(\frac{\delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{input}}{\dot{q}_{input}} = \left[\left(\frac{0.1}{16.2} \right)^2 + \left(\frac{0.005}{1.43} \right)^2 + (0.011671)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{input}}{\dot{q}_{input}} = 0.013658 \text{ or } 1.3658\%$$

- Heat loss from radiation (\dot{q}_{rad})

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \varepsilon (\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{surr}^4) \quad (1.3)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{rad}}{\dot{q}_{rad}} = \left[\left(\frac{\delta \sigma}{\sigma} \right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_w}{\bar{T}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_{surr}}{\bar{T}_{surr}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{rad}}{\dot{q}_{rad}} = \left[\left(\frac{0.01}{5.67} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{0.90} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{33} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{28} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{rad}}{\dot{q}_{rad}} = 0.011900 \text{ or } 1.1900\%$$

- Characteristics length (L_c)

$$L_c = W \quad (1.4)$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = \left[\left(\frac{1}{90} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta A}{A} = 0.011111 \text{ or } 1.1111\%$$

- Rayleigh number (Ra_L)

$$Ra_L = \frac{g\beta(\bar{T}_w - \bar{T}_{surr})L_c^3}{\mu} \text{Pr} \quad (9.5)$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = \left[\left(\frac{\delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\delta \beta}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_w}{\bar{T}_w} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_{surr}}{\bar{T}_{surr}} \right)^2 + \left(\frac{\delta L_c}{L_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 + \left(\frac{\delta \text{Pr}}{\text{Pr}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = \left[\left(\frac{0.01}{9.81} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{25} \right)^2 + \left(\frac{0.05}{33} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{25} \right)^2 + (0.011111)^2 + \left(\frac{0.001}{1.8536} \right)^2 + \left(\frac{0.0002}{0.72904} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} = 0.012614 \text{ or } 1.2614\%$$

- Nusselt number of natural convection (Nu_L)

$$Nu_L = 0.59 \times (Ra_L)^{0.25} \quad (9.6)$$

$$\frac{\delta Nu_L}{Nu_L} = \left(\left(\frac{\delta Ra_L}{Ra_L} \right)^2 \right)^{0.5} = 0.012614 \text{ or } 1.2614\%$$

- Heat transfer coefficient of natural convection (h_{convec})

$$h_{convec} = \frac{Nu_L \cdot k}{L_c} \quad (9.7)$$

$$\frac{\delta h_{convec}}{h_{convec}} = \left[\left(\frac{\delta Nu_L}{Nu_L} \right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k} \right)^2 + \left(\frac{\delta L_c}{L_c} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h_{convec}}{h_{convec}} = \left[(0.012614)^2 + \left(\frac{0.00001}{0.02551} \right)^2 + (0.011111)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h_{convec}}{h_{convec}} = 0.016813 \text{ or } 1.6813\%$$

- Heat loss from convection (\dot{q}_{convec})

$$\dot{q}_{convec} = h_{convec} (\bar{T}_s - \bar{T}_{surr}) \quad (7.8)$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{convec}}{\dot{q}_{convec}} = \left[\left(\frac{\delta h_{convec}}{h_{convec}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_s}{\bar{T}_s} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_{surr}}{\bar{T}_{surr}} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{convec}}{\dot{q}_{convec}} = \left[(0.016813)^2 + \left(\frac{0.05}{33} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{25} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta \dot{q}_{convec}}{\dot{q}_{convec}} = 0.017348 \text{ or } 1.7348\%$$

- Heat transfer coefficient (h)

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{convec}}{\bar{T}_s - \bar{T}_f} \quad (7.9)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[\left(\frac{\delta \dot{q}_{input}}{\dot{q}_{input}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{q}_{rad}}{\dot{q}_{rad}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{q}_{convec}}{\dot{q}_{convec}} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_s}{\bar{T}_s} \right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{T}_f}{\bar{T}_f} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h}{h} = \left[(0.013657)^2 + (0.01190)^2 + (0.017348)^2 + \left(\frac{0.05}{33} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{26} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta h}{h} = 0.025419 \text{ or } 2.5419\%$$

- Nusselt number (Nu)

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (7.10)$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[\left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \left[(0.025419)^2 + \left(\frac{0.01}{5} \right)^2 + \left(\frac{0.00001}{0.02551} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = 0.0255 \text{ or } 2.550\%$$

To find the Reynolds number (Re)

- Average velocity of water jet in flow in pipe (v)

$$V = \frac{Q}{A_{jet}} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (7.11)$$

$$\frac{\delta V}{V} = \left[\left(\frac{\delta Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta V}{V} = \left[\left(\frac{0.025}{435.4} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{5} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta V}{V} = 0.02 \text{ or } 2\%$$

- Reynolds number of water (Re)

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (7.12)$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[\left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\delta \nu}{\nu} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = \left[(0.02)^2 + \left(\frac{0.01}{5} \right)^2 + \left(\frac{0.001}{1.571} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta Re}{Re} = 0.02829 \text{ or } 2.829\%$$

To find the rotation number (R_o)

- Volumetric fraction (β)

$$R_o = \frac{\Omega D}{V} \quad (7.13)$$

$$\frac{\delta R_o}{R_o} = \left[\left(\frac{\delta \Omega}{\Omega} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta R_o}{R_o} = \left[\left(\frac{2}{250} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{5} \right)^2 + (0.02)^2 \right]^{0.5}$$

$$\frac{\delta R_o}{R_o} = 0.02939 \text{ or } 2.939\%$$

ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 1

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน



ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF IMPINGING JETS IN ROTATION CHANNEL

ฐานทัพ นนท์ตุลา

ณัฐพร แก้วชูทอง

ชยุต นันทคุสติ*

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90110

*E-mail: chayut.n@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแถวเดียวในช่องการไหลที่หมุน ที่ระยะห่างระหว่างเจ็ทที่ $S=4D$ ระยะพุ่งชนที่ $L = 2D, 4D$ และ $6D$ ตามลำดับ เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ทที่มีขนาดเท่ากับ 5 mm กำหนดเลขเรย์โนลด์สคงที่เท่ากับ $10,000$ และมีค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0$ และ 0.0066 ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยแผ่นเทอร์โมโครมิกลิกควิดคริสตัล (TLC) จากผลการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนในกรณีที่หมุนจะให้ค่าต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่งสำหรับที่ระยะพุ่งชน $L = 2D$ และ $4D$ ในช่วง 4% ถึง 5.5% แต่ที่ระยะพุ่งชน $L = 6D$ ในกรณีที่หมุนให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่ากรณีหยุดนิ่งในช่วง 4% ถึง 12.5%

คำสำคัญ : เจ็ทพุ่งชน, คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน, เลขการหมุน

Abstract

The main objective of this research is to study heat transfer characteristic of impinging row jets in rotation channel. The distance of pitch was fixed at $S=4D$, jet impingement distances at $L=2D, 4D$ and $6D$ respectively. When D is diameter of jet at 5 mm . The Reynolds number (Re) constant at $10,000$. The rotation number was defined at $Ro=0.0$ and 0.0066 . The heat transfer on the jet impingement surface was measured by a steady Thermo chromic Liquid Crystal technique. The result showed that the heat transfer of impinging jets reduces $4-5.5\%$ compared with stationary case for jet impingement distances at $L = 2D$ and $4D$ however, at $L = 6D$ for rotating case the heat transfer was better than that for stationary case up to $4-12.5\%$

Keywords: Impinging jet, Heat transfer characteristic, Rotation number

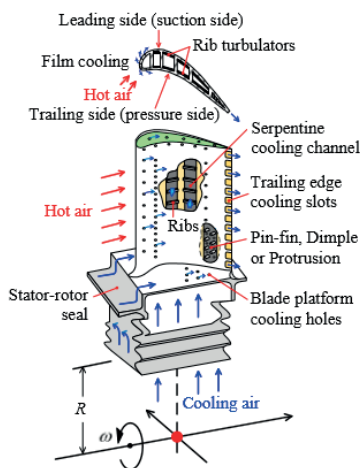
1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ให้สูงมากขึ้นเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยหนึ่งในวิธีที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์คือการเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหัน (Turbine Inlet Temperature: TIT) โดยวิวัฒนาการของการเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ถูกจำกัดไว้ด้วยอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะ ใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์จึงต้องติดตั้งระบบระบายความร้อนโดยแบ่งเป็นการระบายความร้อนภายนอกใบพัดใช้ Film cooling และการระบายความร้อนภายในมีการใช้ เจ็ทพุ่งชน, การติดตั้งครีปสร้างความเป็นป่วนในช่องการไหลวงกลับ และใช้พื้นที่บริเวณส่วนท้ายของใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 1 [1-7] เพื่อยืดอายุการใช้งานและให้ชิ้นส่วนภายในทำงานได้อย่างปลอดภัยในอุณหภูมิที่สูง

การใช้เจ็ทพุ่งชนเป็นการระบายความร้อนแบบภายในที่นิยมใช้ในใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เนื่องจากการใช้เจ็ทพุ่งชนมีจุดเด่นตรงที่เป็นการระบายความร้อนเฉพาะจุดและเป็นการระบาย

ความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเหมาะสำหรับใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ที่มีสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยได้มีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน เช่น ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน, การจัดเรียงของลำเจ็ทและกระแสไหลตัด เป็นต้น อีกทั้งยังมีการศึกษาช่องการไหลที่หมุนเพราะในสภาวะการทำงานจริงของใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์มีผลกระทบจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) และ แรงโคริโอลิส (Coriolis force) ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนของการระบายความร้อนแบบเจ็ทพุ่งชนลดลง Elston และคณะ [8] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแถวเดียวในช่องการไหลที่ไหลที่หมุน ในส่วนของช่องการไหลที่มีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เจ็ทพุ่งชนปะทะจะมีหน้าตัดของช่องการไหลเป็นรูปครึ่งวงกลมเพื่อจำลองให้ใกล้เคียงกับช่องการไหลในบริเวณส่วนหัวของใบพัด ใช้การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยการฝังเทอร์โมคัปเปิล ชนิด T ได้แผ่นทองแดง โดยมีเงื่อนไขการศึกษาที่เลขเรย์โนลด์สตั้งแต่ $10,000$ ถึง $40,000$ และตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 1.4 จากการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขการหมุนส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในช่องการ

ไหลหน้าตัดครึ่งวงกลมลดลงในทุกกรณี Chang และคณะ [9] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนแถวเดี่ยวในช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูที่หมุน โดยใช้วิธีการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยการถ่ายภาพจากกล้องอินฟราเรด โดยมีเงื่อนไขที่เลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 17,500 และตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.3 จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนความร้อนในช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูในลักษณะที่ลำเจ็ททำมุม 45 องศา กับทิศทางการหมุน เปรียบเทียบกรณีหยุดนิ่งและในกรณีที่หมุนพบว่าผลของ Coriolis force ทำให้การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง Yang และคณะ [10] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแบบ Two-Pass ด้วยเจ็ทพุงชนภายใต้เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 25,000 ถึง 100,000 และเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.14 ใช้การวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการ Thermo Liquid Crystal (TLC) โดยใช้เจ็ทพุงชนสองแถว จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนพบว่าในกรณีที่เกิดการหมุนทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงในช่องการไหลแบบวกกลับ Second-Pass ทั้งผนังฝั่งด้าน Leading และ Trailing ประมาณ 25% แต่การหมุนเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลแรก (First-Pass) ในช่วงปลายของช่องการไหล Pason และคณะ [11] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุงชนในช่องการไหลที่หมุน โดยจำลองช่องการไหลที่เจ็ทพุงชนให้ใกล้เคียงกับบริเวณส่วนกลางของใบพัด โดยเจ็ทสองแถว ใช้การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยการฝังเทอร์โมคัปเปิล ชนิด T ได้แผ่นทองแดง ภายใต้เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ที่ 5,000 และ 10,000 และเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0028 จากการศึกษาพบว่ากรณีที่เกิดการหมุนทำให้อัตราส่วนของตัวเลขนัสเซลล์ที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีหยุดนิ่ง โดยที่ผนังด้าน Leading channel ลดลง 15% และผนังด้าน Trailing channel ลดลง 20%



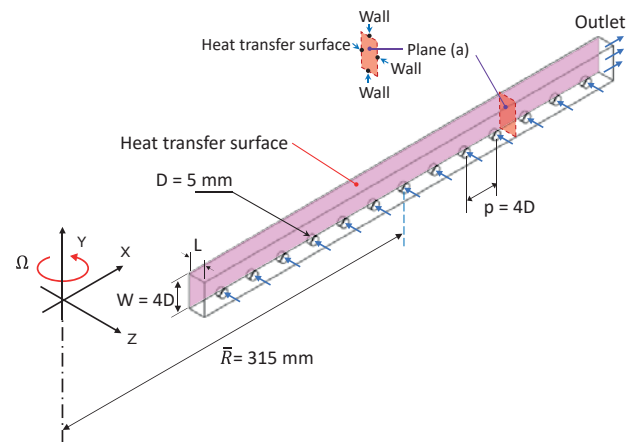
รูปที่ 1 แสดงรูปแบบการถ่ายเทความร้อนในใบพัดกังหันแก๊ส [7] ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเจ็ทพุงชนโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล (TLC) โดยพิจารณาผลของระยะพุงชนที่ $L = 2D, 4D$ และ $6D$ ตามลำดับ โดย D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ทมีค่าเท่ากับ 5 mm ระยะห่างระหว่างเจ็ทที่ $S=4D$ กำหนดเลขเรย์โนลด์

คงที่เท่ากับ 10,000 และมีค่าตัวเลขการหมุน $R_0=0.0$ และ 0.0066 โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบออริฟิสเจ็ท (Orifice nozzle) เป็นเจ็ทแถวเดี่ยวจำนวน 13 รู

2. โมเดลและชุดทดลอง

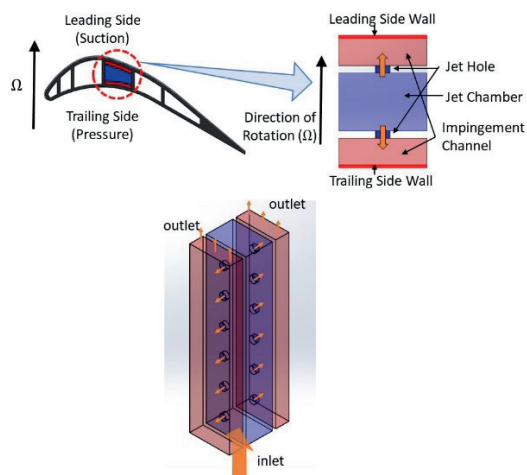
2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงโมเดลของช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษา โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบออริฟิสเจ็ท (Orifice nozzle) เป็นเจ็ทแถวเดี่ยว โดยอากาศจากเพลลาหมุนเข้าสู่ส่วนทดสอบที่ติดอยู่กับเพลลาเป็นแขนการหมุนหลังจากเข้าสู่ส่วนทดสอบอากาศจะไหลผ่านแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 mm ที่เจาะรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ $D = 5$ mm จำนวน 13 รู และพุงออกจากรูเจ็ทจากนั้นปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ประมาณ 760 W/m^2 ทดลองที่ระยะพุงชน $L=2D, 4D$ และ $6D$ ตามลำดับ ความกว้างช่องการไหล $W=4D$ ระยะห่างระหว่างเจ็ทที่ $S=4D$ แขนการหมุนมีรัศมีเฉลี่ยเท่ากับ 315 mm กำหนดค่าตัวเลขการหมุน $R_0=0.0$ และ 0.0066 และมีค่าเรย์โนลด์สันัมเบอร์คงที่เท่ากับ 10,000 โดยอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะถูกบังคับให้ออกที่ทางออกด้านปลายสุดของแขนการหมุนเพียงทางออกเดียว



รูปที่ 2 แสดงโมเดลของช่องการไหลที่ศึกษา

รูปที่ 3 แสดงทิศทางการหมุนของช่องการไหลที่ทำให้เกิดผนังด้าน Leading และ Trailing โดยช่องการไหลนี้จำลองบริเวณช่วงกลางใบพัด ในส่วนของโมเดลช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษานี้มีเพียงช่องการไหลเดียวการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนผนังด้าน Leading และ Trailing ด้วยการเปลี่ยนทิศทางการหมุน โดยถ้าหากทิศทางการหมุนมีทิศทางเดียวกับเจ็ทพุงชนจะทำให้เกิดผนังด้าน Leading และถ้าหากทิศทางการหมุนมีทิศตรงกันข้ามกับทิศทางการพุงชนจะทำให้เกิดผนังด้าน Trailing ในการทดลองควบคุมอุณหภูมิทางเข้าส่วนทดสอบที่ $26.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ และควบคุมอุณหภูมิห้องที่ $25.0 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$



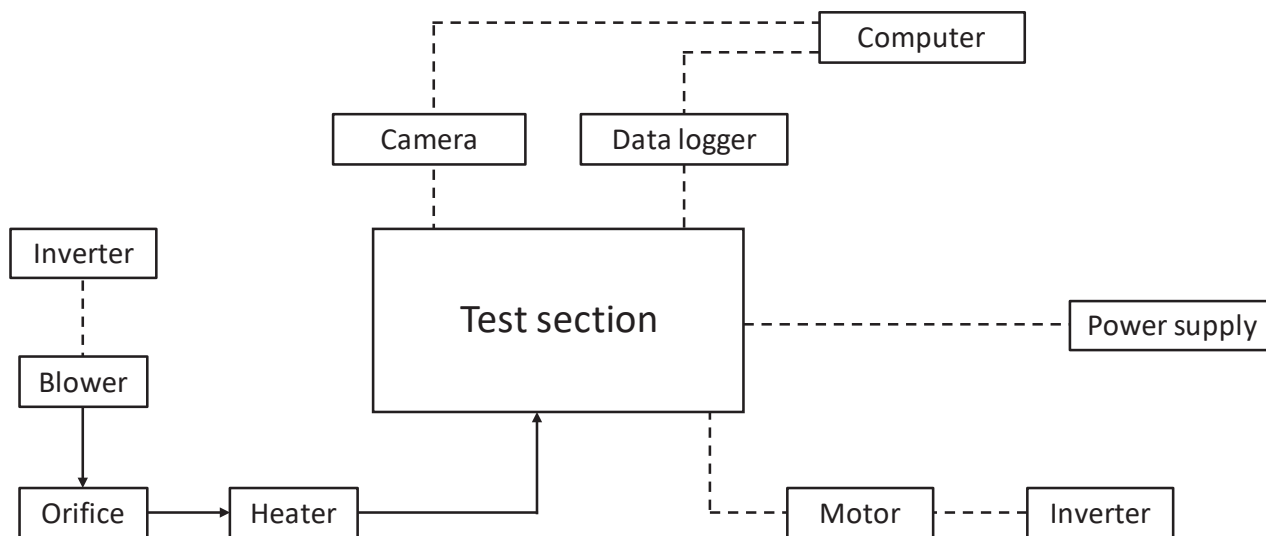
รูปที่ 3 แสดงทิศทางการหมุนของช่องการไหลที่ทำให้เกิดด้าน Leading และ Trailing โดยช่องการไหลจำลองบริเวณช่วงกลางใบพัด

2.2 ชุดทดลอง

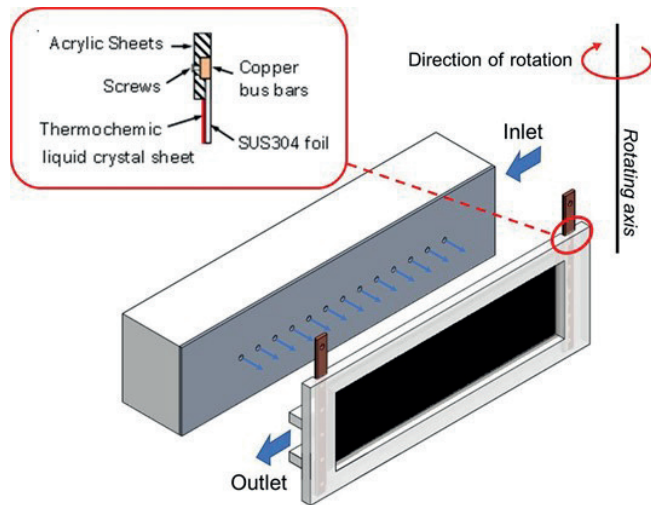
รูปที่ 4 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาโดยที่โบลเวอร์ (Blower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างการไหลในระบบโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 750 W เป็นตัวขับใบพัดของโบลเวอร์ และใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่ได้กำหนด หลังจากนั้นอากาศจากโบลเวอร์จะไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศ จะติดตั้งไว้ระหว่างท่อที่มีอากาศไหลผ่านและถูกควบคุมอุณหภูมิก่อนเข้าส่วนทดสอบที่ 26.0 ± 0.1 °C สำหรับส่วนทดสอบถูกประกอบเข้ากับ

บริเวณส่วนปลายของแขนการหมุน (Rotating arm) ซึ่งต่อกับแกนการหมุนและถูกควบคุมการหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านสายพาน โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าจะถูกควบคุมการหมุนด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในขณะที่ความเร็วการหมุนถูกวัดด้วย เครื่องวัดความเร็วรอบ และสำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดทดสอบที่บังคับให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทิศไปมาในวงจรเพื่อจ่ายพลังความร้อนให้กับแผ่นสเตนเลสบนพื้นผิวชุดทดสอบของช่องการไหลหมุนต่อมาจากรีจายไฟฟ้ากระแสตรง (DC-power supply) โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น Thermochromic Liquid Crystal (TLC) ด้วยกล้องดิจิทัลและเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิห้องที่ทำการทดลองและอุณหภูมิก่อนเข้าส่วนทดสอบด้วย Data logger

จากรูปที่ 5 แสดงส่วนทดสอบ โดยอากาศที่ไหลเข้าส่วนทดสอบจะเข้ามาที่ห้องหัวฉีด (Jet chamber) หลังจากนั้นผ่านแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 mm ที่เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 5$ mm จำนวน 13 รู เข้าปะทะกับผนังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแผ่นสเตนเลสที่ถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นอะคริลิกหนา 10 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 90×280 mm² ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสเตนเลสบาง (Stainless foil) ไว้ทั้งสองข้าง แท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC-Power supply) และด้านบนของแผ่นสเตนเลสบางถูกติดด้วยแผ่น TLC ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิของการวัดระหว่าง 30-35°C สำหรับการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยกล้องดิจิทัล ในการจับภาพแต่ละเงื่อนไขจะกำหนดที่ 100 ภาพ ซึ่งภาพที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวหรือค่าเลขนัสเซลที่เฉลี่ยบนพื้นผิว



รูปที่ 4 แผนภาพชุดทดลอง



รูปที่ 5 ส่วนทดสอบ

การศึกษาการถ่ายเทความร้อน

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสบาง จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งบริเวณแผ่นสแตนเลสบาง ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่าย V คือ แรงดันไฟฟ้า A คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

สำหรับการทดลองนี้จะใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องไหลผ่านพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{loss, convection} - \dot{q}_{loss, radiation} - \dot{q}_{loss, conduction}}{T_w - T_f} \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{q}_{loss, convection}$ และ $\dot{q}_{loss, radiation}$ คือ การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีจากพื้นผิวทดสอบไปสู่บรรยากาศ $\dot{q}_{loss, conduction}$ คือ ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นสแตนเลสและแผ่น TLC สำหรับ T_w คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวของแผ่น TLC และ T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ไหลผ่านชุดทดสอบสามารถคำนวณได้จาก

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (3)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบและ T_o คือ อุณหภูมิหลังเข้าสู่ชุดทดสอบ

จากสมการ (2) สามารถคำนวณหาค่าเลขนัสเซลต์ได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Re = \frac{V_j D}{\nu} \quad (5)$$

ค่าตัวเลขการหมุน (Rotation number, R_o) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$R_o = \frac{\Omega D}{V_j} \quad (6)$$

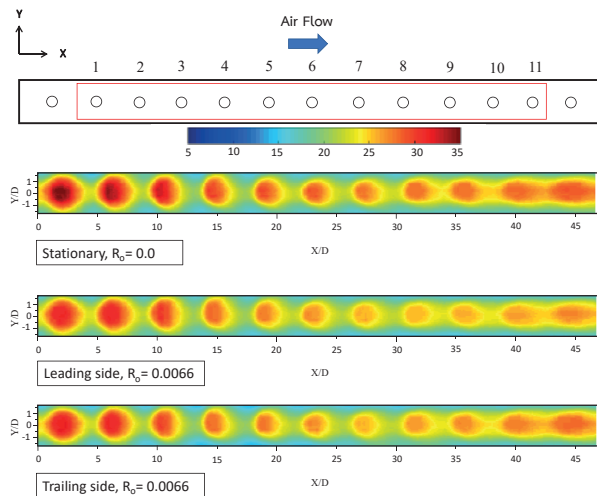
เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ทที่มีขนาดเท่ากับ 5 mm, ν คือ ความหนืดไคเนเมติกของอากาศ, V_j คือ ความเร็วของอากาศที่ปากทางออกเจ็ท และ Ω คือ ความเร็วของการหมุน

4. ผลการทดลอง

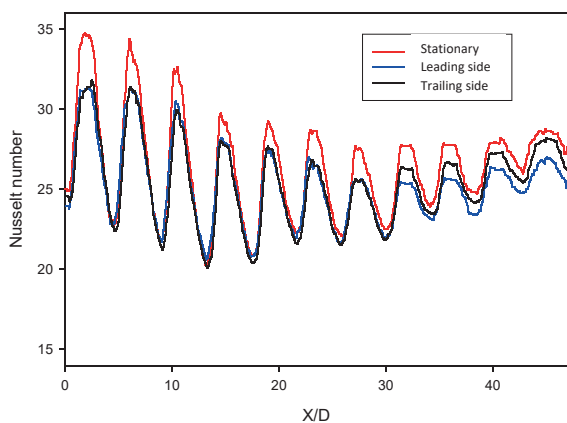
4.1 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทพุ่งชนที่ระยะพุ่งชน $L=2D$

รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะพุ่งชน $L=2D$ ภายใต้เงื่อนไขตัวเลขการหมุน $R_o=0.0066$ (คำนวณจากความเร็วรอบการหมุนที่ 400 rpm) เปรียบเทียบพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง จากผลการทดลองพบว่า การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวของกรณีหยุดนิ่งสูงกว่าพื้นผิวด้าน Leading 5.5% และ พื้นผิวด้าน Trailing 4% ภาพรวมการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลต์บนพื้นผิวสำหรับระยะพุ่งชน $L=2D$ สูงกว่าระยะพุ่งชนอื่นๆ รูปที่ 7 แสดงเลขนัสเซลต์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ บริเวณก่อนกระแสไหล

(Upstream) ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading และ Trailing ต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่ง ในส่วนบริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในด้าน Trailing มีเลขนัสเซลที่สูงกว่าด้าน Leading เล็กน้อยแต่ยังคงมีค่าต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่งอยู่



รูปที่ 6 การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลที่บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=2D$

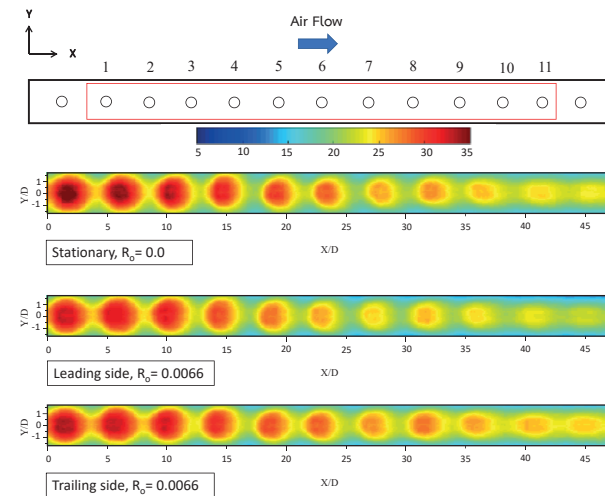


รูปที่ 7 เลขนัสเซลที่ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ โดยที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=2D$

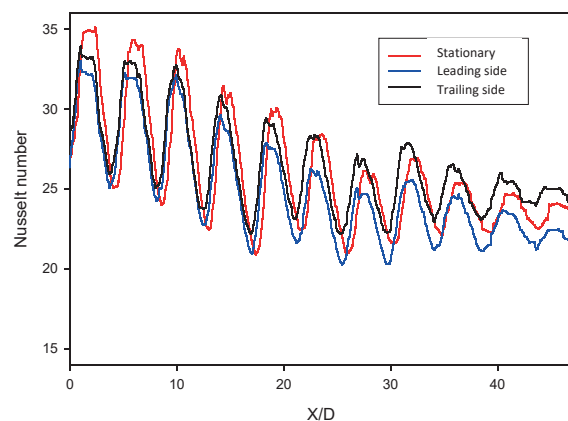
4.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทฟุ้งชนที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$

รูปที่ 8 แสดงการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลที่บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=4D$ ภายใต้เงื่อนไขตัวเลขการหมุน $R_0=0.0066$ (คำนวณจากความเร็รรอบการหมุนที่ 400 rpm) เปรียบเทียบพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง จากผลการทดลองพบว่า การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลที่บนพื้นผิวด้าน Leading ต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่ง 4% ในส่วนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Trailing มีการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลที่ใกล้เคียงกับกรณีหยุดนิ่งมาก รูปที่ 9 แสดงเลขนัสเซลที่ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ ในพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading มีเลขนัสเซลที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ในส่วนของพื้นผิว

แลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Trailing บริเวณก่อนกระแสไหล (Upstream) จะให้ค่าเลขนัสเซลที่ต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่งอยู่เล็กน้อย แต่บริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ให้ค่าเลขนัสเซลที่สูงกว่ากรณีหยุดนิ่ง



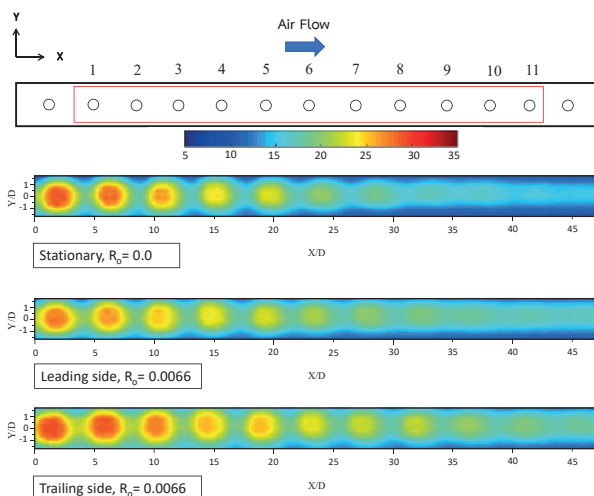
รูปที่ 8 การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลที่บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=4D$



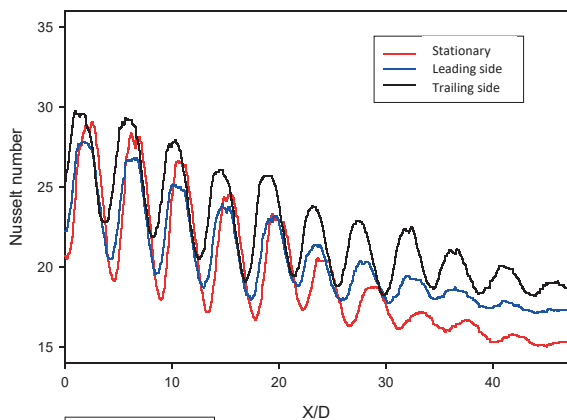
รูปที่ 9 เลขนัสเซลที่ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ โดยที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=4D$

4.3 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทฟุ้งชนที่ระยะฟุ้งชน $L=6D$

รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลที่บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=4D$ ภายใต้เงื่อนไขตัวเลขการหมุน $R_0=0.0066$ (คำนวณจากความเร็รรอบการหมุนที่ 400 rpm) ภาพรวมการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลที่บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระยะฟุ้งชนอื่นๆ รูปที่ 11 เลขนัสเซลที่ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ จากผลการทดลองพบว่าพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Trailing และ Leading มีเลขนัสเซลที่สูงกว่ากรณีหยุดนิ่ง 12.5% และ 4% ตามลำดับ ซึ่งต่างจากผลการทดลองที่ระยะฟุ้ง $L=2D$ และ $L=4D$ และในส่วนของบริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ด้าน Leading ยังมีเลขนัสเซลที่สูงกว่ากรณีหยุดนิ่งอีกด้วย



รูปที่ 10 การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=6D$



รูปที่ 11 เลขนัสเซลท์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ โดยที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=6D$

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทฟุ้งชน ผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนแถวเดียวที่มีปากทางออกแบบออร์ทิโกสในกรณีหยุดนิ่ง ($R_0=0.0$) เมื่อเพิ่มระยะฟุ้งชนที่ $L=2D, 4D$ และ $6D$ ค่าการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทกับพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนที่เพิ่มมากขึ้น
2. สำหรับช่องการไหลที่หมุนด้วยค่าตัวเลขการหมุน, $R_0=0.0066$ ที่ระยะฟุ้งชน $L=2D$ และ $4D$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ต่ำกว่ากรณีหยุดนิ่ง มีเพียงบริเวณหลังกระแสการไหล (Downstream) ของด้าน Trailing ที่ระยะฟุ้งชน $L=4D$ เท่านั้นที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งอยู่เล็กน้อย

3. ผลของการหมุนส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของช่องการไหลที่หมุนทั้งในด้าน Leading และ Trailing ที่ระยะฟุ้งชน $L=6D$ นั้นให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งประมาณ 4% ถึง 12.5% ตามลำดับ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.M. Ligrani, and G.I. Mahmood, (2003), "Variable property Nusselt numbers in a channel with pin fins," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 17, pp. 103–111.
- [2] W. Siddique, N.A. Khan, and I. Haq, (2015), "Analysis of numerical results for two-pass trapezoidal channel with different cooling configurations of trailing edge: the effect of dimples," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 89, pp. 763–771.
- [3] Y. Chen, Y.T. Chew, and B.C. Khoo, (2013), "Heat transfer and flow structure in turbulent channel flow over protrusions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, pp. 177–191.
- [4] C. Wang, Z.L. Liu, G.M. Zhang, and M. Zhang, (2013), "Experimental investigations of flat plate heat pipes with interlaced narrow grooves or channels as capillary structure," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 48, pp. 222–229.
- [5] J.C. Han, and H.C. Chen, (2006), "Turbine blade internal cooling passages with rib turbulators," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, pp. 226–248.
- [6] F. Kreith, and D. Margolis, (1959), "Heat transfer and friction in turbulent vortex flow," *Applied Scientific Research*, Vol. 8, pp. 457–473.
- [7] N. Kaewchoothong, K. Maliwan, K. Takeishi, and C. Nuntadusit, (2018), "Effect of rotation number on flow and heat transfer characteristics in serpentine passage with ribbed walls," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, pp. 4461–4471.
- [8] C.M. Elston and L.M. Wright, (2015), "Leading Edge Jet Impingement Under High Rotation Numbers," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 120, pp. 368–375.
- [9] W.S. Chang and K. Yu, (2019), "Thermal performance of radially rotating trapezoidal channel with impinging jet-row" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 136, pp. 246–264.
- [10] L. Yang, K. Tyag, S. Ekkad, and J. Ren, (2015), "Influence of Rotation on Heat Transfer in A Two-pass Channel with Impingement Under High Reynolds Number" *Turbine Technical Conference and Exposition*, June 15–19, Canada.
- [11] J.A. Pason, J.C. Han, and C.P. Lee, (1998), "Rotation Effect on Jet Impingement Heat Transfer in Smooth Rectangular Channels With Four Heated Walls and Radially Outward Crossflow" *Journal of Turbomachinery*, vol. 120, pp. 79–85.

ภาคผนวก ง. บทความสำหรับเผยแพร่ 2

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทพวงชนแฉวเดี่ยว



การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทพุงชนแถวเดี่ยว Heat Transfer Investigation of Rotating Channel with Impinging Jet-row

ฐานทัพนันทิตุลา, ณัฐพร แก้วชอุทอง และ ชยุต นันทคุสิติ*

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

*ติดต่อ: chayut.n@psu.ac.th

บทคัดย่อ

เจ็ทพุงชนนิยมนำมาใช้ในการระบายความร้อนภายในใบพัดกังหันแก๊สเทอร์ไบน์ ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่หมุนด้วยแถวเจ็ทพุงชนแถวเดี่ยว โดยเงื่อนไขประกอบด้วยการระยะพุงชนที่ $L = 2D, 4D$ และ $6D$ และความเร็วการหมุนที่ 0 และ 250 รอบต่อนาทีที่เลขเรย์โนลด์ = 9,000 โดยที่ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทมีขนาด 5 mm ในการทดลองมีการกำหนดตำแหน่งทางออกที่ปลายของแขนการหมุนเพียงตำแหน่งเดียวเพื่อให้เห็นอิทธิพลของกระแสไหลตัด การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยน ความร้อนนั้นวัดโดยใช้เทคนิค Thermo-chromic Liquid Crystal การถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้าน Leading และ ผนังด้าน Trailing ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีหยุดนิ่งในทุกๆระยะพุงชน

คำหลัก: เจ็ทพุงชน, การถ่ายเทความร้อน, การหมุน, กระแสไหลตัด

Abstract

Impinging jet is used for internal cooling in a gas turbine blade. In this study heat transfer on rotating channel with impinging jet-row by the condition consisted of jet impingement distance at $L=2D, 4D$ and $6D$ and rotation speed at 0 to 250 rpm at Reynold number=9,000. Where D is the diameter of the jet is 5 mm. In the experiment, In the experiment there define the outlet position at the end of the rotation arm in only one position to see the effect of Crossflow. The heat transfer on jet impingement surface was measured by using steady Thermo-chromic Liquid Crystal technique. The heat transfer on a Leading side wall and Trailing side wall give higher heat transfer value than the stationary case at all jet impingement distance.

Keywords: Impinging jet, Heat transfer, Rotation, Crossflow

1 บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ให้สูงมากขึ้นเพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยหนึ่งในวิธีที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์คือการเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหัน (Turbine Inlet Temperature: TIT) โดยวิวัฒนาการของการเพิ่มอุณหภูมิทางเข้ากังหันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ถูกจำกัดไว้ด้วยอุณหภูมิจุดหลอมเหลว

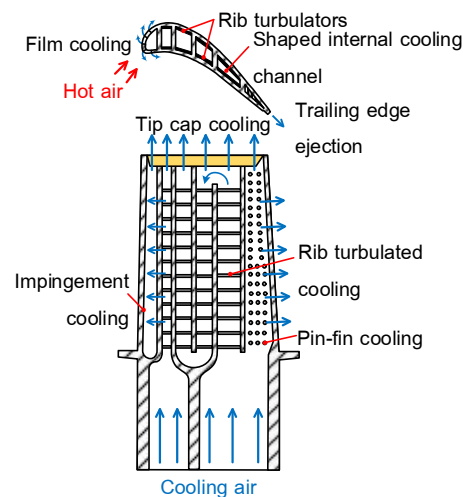
ของโลหะ ใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์จึงต้องติดตั้งระบบระบายความร้อนโดยแบ่งเป็นการระบายความร้อนภายนอกใบพัดใช้ Film cooling และการระบายความร้อนภายในมีการใช้ เจ็ทพุงชน, การติดตั้งสร้างความเป็นป่วนในช่องการไหลกลับและใช้พินบริเวณส่วนท้ายของใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 1 [1-7] เพื่อยืดอายุการใช้งานและให้ชิ้นส่วนภายในทำงานได้อย่างปลอดภัยในอุณหภูมิที่สูง

การใช้เจ็ทพุงชนเป็นการระบายความร้อนที่นิยมใช้ในใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เนื่องจากการใช้เจ็ทพุง



ชนมีจุดเด่นตรงที่เป็นการระบายความร้อนเฉพาะจุดและเป็น การระบายความร้อนบนพื้นผิวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเหมาะสำหรับ ใบพัดกังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบที่มีสภาวะการทำงานที่ อุณหภูมิสูง โดยในหลายงานวิจัยได้มีการศึกษาผลกระทบของ ตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน เช่น ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่พุ่งชน, การจัดเรียง ของลำเจ็ท และกระแสไหลตัด เป็นต้น อีกทั้งยังมีการศึกษา ช่องการไหลที่หมุนเพราะในสภาวะการทำงานจริงของใบพัด กังหันเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบมีผลกระทบจากแรงหนี ศูนย์กลาง (Centrifugal force) และ แรงโคริโอลิส (Coriolis force) ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนของการระบายความร้อน แบบเจ็ทพุ่งชนลดลง Elston และคณะ [8] ศึกษาการถ่ายเท ความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแถวเดียวในช่องการไหลที่ไหลที่หมุน ในส่วนของช่องการไหลที่มีพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เจ็ท พุ่งชนปะทะจะมีหน้าตัดของช่องการไหลเป็นรูปครึ่งวงกลม เพื่อจำลองให้ใกล้เคียงกับช่องการไหลจริงในบริเวณส่วนหัว ของใบพัด ใช้การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยการฝังเทอ โมคัปเปิล ชนิด T ได้แผ่นทองแดง โดยมีเงื่อนไขที่เลขเรย์ โนลด์ตั้งแต่ 10,000 ถึง 40,000 และตัวเลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 1.4 การศึกษาของพวกเขาพบว่าภายใต้เงื่อนไขการหมุน ส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลหน้าตัดครึ่ง วงกลมลดลงในทุกกรณี Chang และคณะ [9] ศึกษาการ ถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแถวเดียวในช่องการไหลหน้า ตัดสี่เหลี่ยมคางหมูที่หมุน โดยใช้วิธีการวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยการถ่ายภาพจากกล้องอินฟราเรด โดยมี เงื่อนไขที่เลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 5,000 ถึง 17,500 และตัวเลข การหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.3 จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อน ความร้อนในช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมูในลักษณะที่ ลำเจ็ททำมุม 45 องศา กับทิศทางการหมุน เปรียบเทียบกรณี หยุดนิ่งและในกรณีที่หมุนพบว่าผลของ Coriolis force ทำ ให้การกระจายตัวของเลขนัสเซลล์ที่ไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับ กรณีหยุดนิ่ง Yang และคณะ [10] ศึกษาการถ่ายเทความร้อน ในช่องการไหลแบบ Two-Pass ด้วยเจ็ทพุ่งชนภายใต้เงื่อนไข เลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 25,000 ถึง 100,000 เลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.14 ใช้การวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วย วิธีการ Transient Liquid Crystal (TLC) โดยใช้เจ็ทพุ่งชน

สองแถว จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนพบว่าในกรณีที่ เกิดการหมุนทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนลดลงในช่องการ ไหล Second-Pass ทั้งฝั่ง Leading และ Trailing 25% แต่การหมุนเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหล First-Pass ในช่วงปลายของช่องการไหล Pason และคณะ [11] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่ หมุน โดยจำลองช่องการไหลที่เจ็ทพุ่งชนให้ใกล้เคียงกับ บริเวณส่วนกลางของใบพัด โดยเจ็ทสองแถว ใช้การวัด อุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยการฝังเทอโมคัปเปิล ชนิด T ได้แผ่น ทองแดง ภายใต้เงื่อนไขเลขเรย์โนลด์ที่ 5,000 และ 10,000 เลขการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 0.0028 จากการศึกษาพบว่ากรณีที่ เกิดการหมุนทำให้อัตราส่วนของตัวเลขนัสเซลล์ลดลงเมื่อ เทียบกับกรณีหยุดนิ่ง โดยที่ Leading channel ลดลง 15% และTrailing channel 20%



รูปที่ 1 แสดงรูปแบบการถ่ายเทความร้อนภายในใบกังหัน แก๊ส

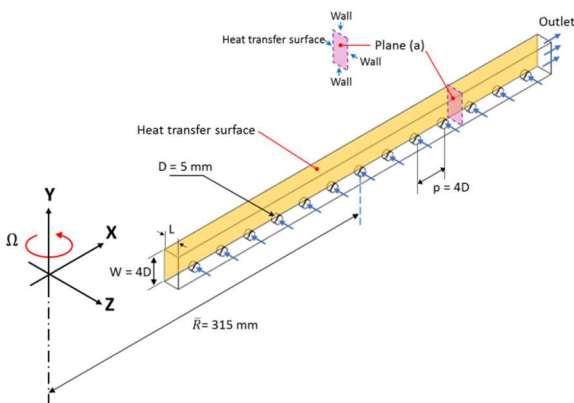
ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเจ็ทพุ่งชนโดยใช้แผ่น เทอร์โมโครมิกกลีควิดคริสตัล (TLC) โดยพิจารณาผลของระยะ พุ่งชนที่ $L = 2D, 4D$ และ $6D$ ตามลำดับ โดย D คือ เส้นผ่าน ศูนย์กลางของท่อเจ็ทมีค่าเท่ากับ 5 mm ระยะห่างระหว่าง เจ็ทที่ $S=4D$ กำหนดค่าเรย์โนลด์สนัมเบอร์คอร์ทที่เท่ากับ $9,000$ และมีค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0$ และ 0.0046 โดยลักษณะ ของเจ็ทเป็นแบบออริฟิซเจ็ท (Orifice nozzle) เป็นเจ็ทแถว เดี่ยวจำนวน 13 รู



2 โมเดลและชุดทดลอง

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

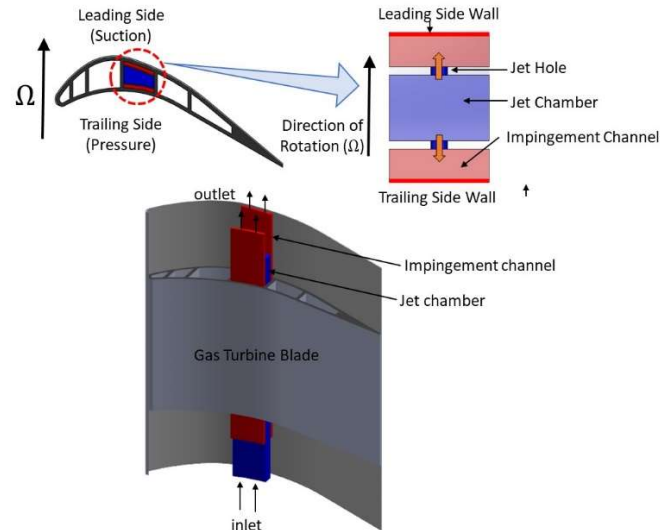
รูปที่ 2 แสดงโมเดลของช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษา โดยลักษณะของเจ็ทเป็นแบบออริฟิสเจ็ท (Orifice nozzle) เป็นเจ็ทแถวเดียว โดยอากาศจากเพลลาหมุนเข้าสู่ส่วนทดสอบที่ติดอยู่กับเพลลาเป็นแขนการหมุนหลังจากเข้าสู่ส่วนทดสอบอากาศจะไหลผ่านแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 mm ที่เจาะรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ $D = 5 \text{ mm}$ จำนวน 13 รูและพุ่งออกจากรูเจ็ทจากนั้นปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ประมาณ 750 W/m^2 ทดลองที่ระยะพุ่งชน $L=2D, 4D$ และ $6D$ ตามลำดับ ความกว้างช่องการไหล $W=4D$ ระยะห่างระหว่างเจ็ทที่ $S=4D$ แขนการหมุนมีรัศมีเฉลี่ยเท่ากับ 315 mm กำหนดค่าตัวเลขการหมุน $Ro=0.0$ และ 0.0046 และมีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์คงที่เท่ากับ 9,000 โดยอากาศที่ปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะถูกบังคับให้ออกที่ทางออกด้านปลายสุดของแขนการหมุนเพียงทางออกเดียว



รูปที่ 2 แสดงโมเดลของช่องการไหลที่ศึกษา

รูปที่ 3 แสดงทิศทางการหมุนของช่องการไหลที่ทำให้เกิดด้าน Leading และ Trailing โดยช่องการไหลนี้จำลองบริเวณช่วงกลางใบพัด ในส่วนของโมเดลช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษานี้มีเพียงช่องการไหลเดียวการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading และ Trailing ด้วยการเปลี่ยนทิศทางการหมุน โดยถ้าหากทิศทางการหมุนมีทิศทางเดียวกับเจ็ทพุ่งชนจะทำให้เกิดด้าน Leading และถ้าหากทิศทางการหมุนมีทิศตรงกันข้ามกับ

ทิศทางของเจ็ทพุ่งชนจะทำให้เกิดด้าน Trailing ในการทดลองควบคุมอุณหภูมิทางเข้าส่วนทดสอบที่ $27.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ และควบคุมอุณหภูมิห้องที่ $25.0 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 3 แสดงทิศทางการหมุนของช่องการไหลที่ทำให้เกิดด้าน Leading และ Trailing โดยช่องการไหลจำลองบริเวณช่วงกลางใบพัด

2.2 ชุดทดลอง

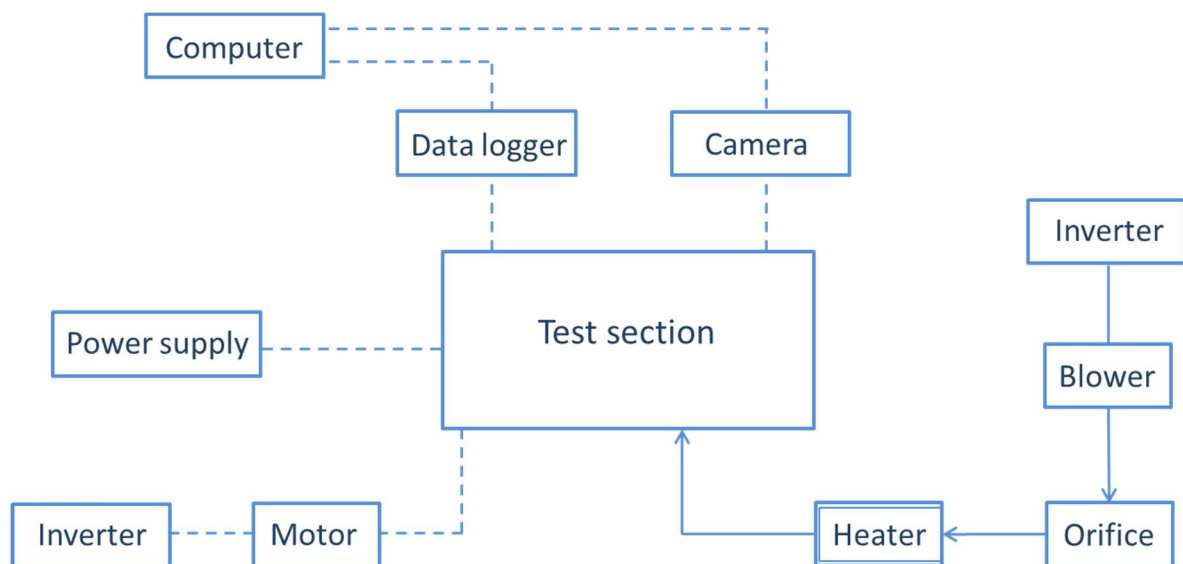
รูปที่ 4 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาโดยที่โบลเวอร์ (Blower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างการไหลในระบบโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 750 W เป็นตัวขับเคลื่อนของโบลเวอร์ และใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่ได้กำหนด หลังจากนั้นอากาศจากโบลเวอร์จะไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศ จะติดตั้งไว้ระหว่างท่อที่มีอากาศไหลผ่านและถูกควบคุมอุณหภูมิก่อนเข้าส่วนทดสอบที่ $27.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ สำหรับส่วนทดสอบถูกประกอบเข้ากับบริเวณส่วนปลายของแขนการหมุน (Rotor arm) ซึ่งต่อกับแกนการหมุนและถูกควบคุมการหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านสายพาน โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าจะถูกควบคุมการหมุนด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในขณะที่ความเร็วการหมุนถูกวัดด้วย เครื่องวัดความเร็วรอบ (Encoder) และสำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดทดสอบโดยใช้วงแหวนลื่น (Slip ring) ซึ่งทำหน้าที่บังคับให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทิศไปมาในวงจร



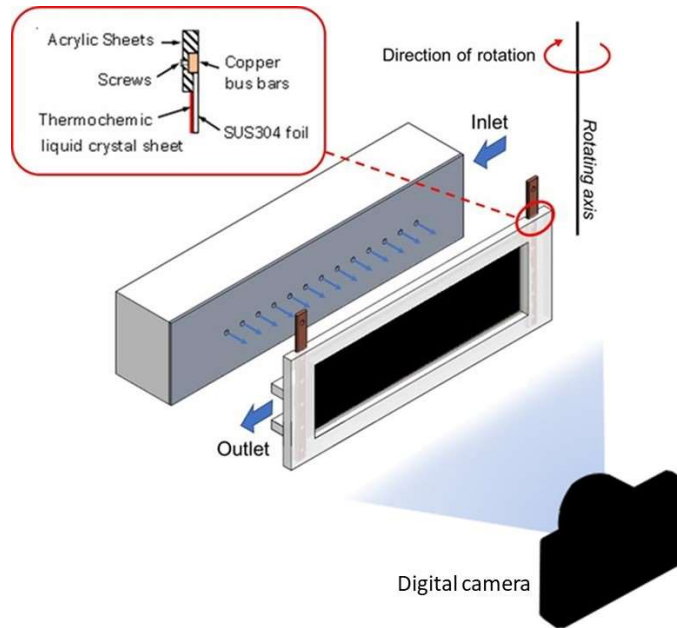
เพื่อจ่ายฟลักซ์ความร้อนให้กับแผ่นสแตนเลสบนพื้นผิวชุดทดสอบของช่องการไหลหมุนต่อมาจากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC-power supply) โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น Thermochromic Liquid Crystal (TLC) ด้วยกล้องดิจิทัลและเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิห้องที่ทำการทดลองและอุณหภูมิก่อนเข้าส่วนทดสอบด้วย Data logger

รูปที่ 5 แสดงส่วนทดสอบ โดยอากาศที่ไหลเข้าส่วนทดสอบจะเข้ามาที่ห้องหัวฉีด (Jet chamber) หลังจากนั้นผ่านแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 mm ที่เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 5 \text{ mm}$ จำนวน 13 รู เข้าปะทะกับผนังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแผ่นสแตนเลสที่ถูกซิงให้เรียบตั้งกับแผ่นอะคริลิกหนา 10 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด $90 \times 280 \text{ mm}^2$

ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสบาง (Stainless foil) ไว้ทั้งสองข้าง แท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC-Power supply) และด้านบนของแผ่นสแตนเลสบางถูกติดด้วยแผ่น TLC ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิของการวัดระหว่าง $30\text{-}35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวด้วยกล้องดิจิทัล ในการจับภาพแต่ละเงื่อนไขจะกำหนดที่ 100 ภาพ ซึ่งภาพที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวหรือค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยบนพื้นผิว โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity coefficient) ของแผ่น TLC เท่ากับ 0.9



รูปที่ 4 แผนภาพชุดทดลอง



รูปที่ 5 ส่วนทดสอบ

3 วิธีการทดลอง

3.1 วิธีการวัดการถ่ายเทความร้อน

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสบาง จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งบริเวณแผ่นสแตนเลสบาง ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (1)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่าย V คือ แรงดันไฟฟ้า A คือ พื้นที่ของพื้นผิวถ่ายเทความร้อน

สำหรับการทดลองนี้จะใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องไหลผ่านพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{loss, convection} - \dot{q}_{loss, radiation} - \dot{q}_{loss, conduction}}{T_w - T_f} \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{q}_{loss, convection}$ และ $\dot{q}_{loss, radiation}$ คือ การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีจากพื้นผิวทดสอบไปสู่บรรยากาศ $\dot{q}_{loss, conduction}$ คือ ความร้อนสูญเสียเนื่องจาก

การนำความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นสแตนเลสและแผ่น TLC สำหรับ T_w คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวของแผ่น TLC และ T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ไหลผ่านชุดทดสอบสามารถคำนวณได้จาก

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (3)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิก่อนเข้าสู่ชุดทดสอบและ T_o คือ อุณหภูมิหลังเข้าสู่ชุดทดสอบ

จากสมการ (2) สามารถคำนวณหาค่าเลขนัสเซลต์ได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4)$$

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Re = \frac{V_f D_h}{\nu} \quad (5)$$

ค่าตัวเลขการหมุน (Rotation number, Ro) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้



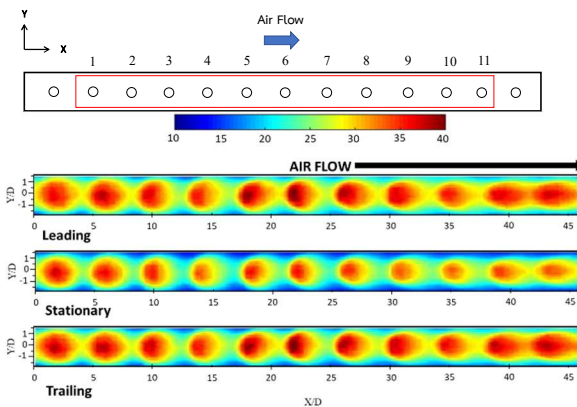
$$R_o = \frac{\Omega D_h}{V_j} \quad (6)$$

เมื่อ D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ทที่มีขนาดเท่ากับ 5 mm, v คือ ความหนืดไคเนติกของอากาศ, V_j คือ ความเร็วของอากาศที่ปากทางออกเจ็ท และ Ω คือความเร็วของการหมุน

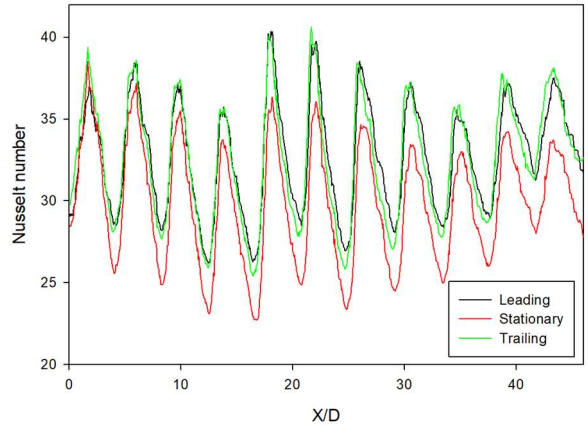
4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทพุ่งชนที่ระยะพุ่งชน $L=2D$

รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะพุ่งชน $L=2D$ ภายใต้เงื่อนไขตัวเลขการหมุน $Ro=0.0046$ (คำนวณจากความเร็วรอบการหมุนที่ 250 rpm) เปรียบเทียบพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง จากผลการทดลองพบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวของกรณีหยุดนิ่งต่ำกว่าพื้นผิวด้าน Leading และ Trailing ภาพรวมการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวสำหรับระยะพุ่งชน $L=2D$ สูงกว่าระยะพุ่งชนอื่นๆ รูปที่ 7 แสดงเลขนัสเซลท์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ บริเวณ ก่อน กระแสไหล (Upstream) และ บริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading และ Trailing สูงกว่ากรณีหยุดนิ่ง



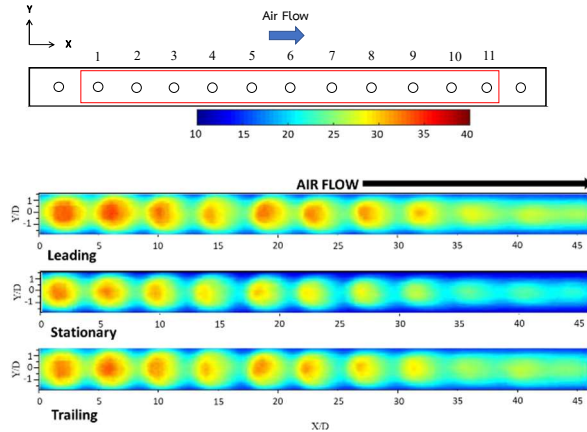
รูปที่ 6 การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะพุ่งชน $L=2D$



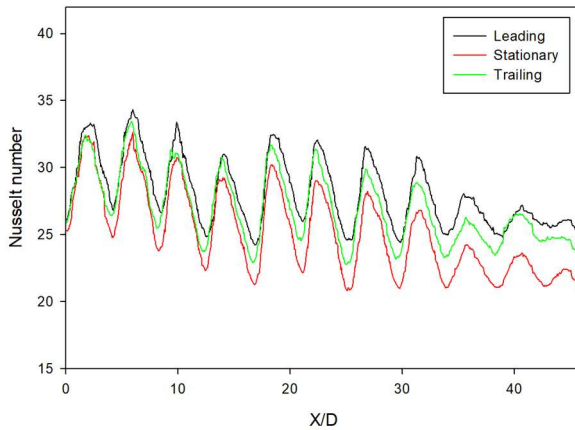
รูปที่ 7 เลขนัสเซลท์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ โดยที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะพุ่งชน $L=2D$

4.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทพุ่งชนที่ระยะพุ่งชน $L=4D$

รูปที่ 8 แสดงการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=10,000$ สำหรับระยะพุ่งชน $L=4D$ ภายใต้เงื่อนไขตัวเลขการหมุน $Ro=0.0046$ (คำนวณจากความเร็วรอบการหมุนที่ 250 rpm) เปรียบเทียบพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading และ Trailing กับกรณีหยุดนิ่ง จากผลการทดลองพบว่าการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซลท์บนพื้นผิวกรณี Stationary ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกรณี รูปที่ 9 แสดงเลขนัสเซลท์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ ในพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนกรณี Stationary มีเลขนัสเซลท์ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ในส่วนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Trailing และ Leading บริเวณก่อนกระแสไหล (Upstream) จะให้ค่าเลขนัสเซลท์สูงกว่ากรณีหยุดนิ่งแต่บริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) ให้ค่าเลขนัสเซลท์สูงกว่ากรณีหยุดนิ่ง



รูปที่ 8 การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซิลท์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=4D$

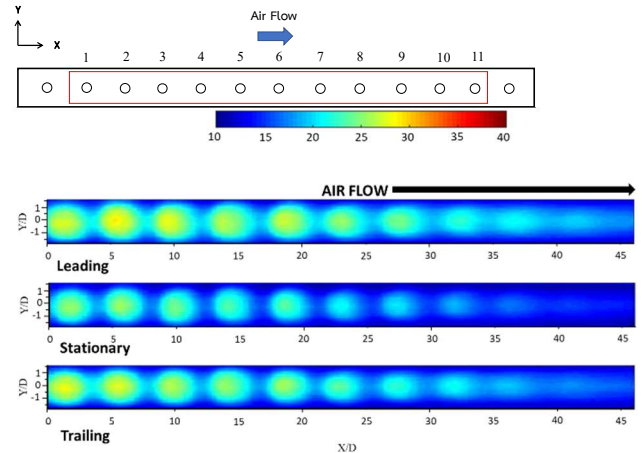


รูปที่ 9 เลขนัสเซิลท์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ โดยที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=4D$

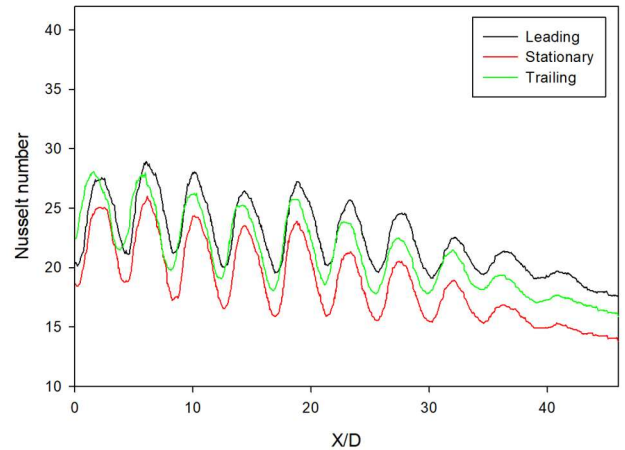
4.3 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทฟุ้งชนที่ระยะฟุ้งชน $L=6D$

รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซิลท์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=4D$ ภายใต้เงื่อนไขตัวเลขการหมุน $Ro=0.0046$ (คำนวณจากความเร็รรอบการหมุนที่ 400 rpm) ภาพรวมการกระจายตัวของตัวเลขนัสเซิลท์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระยะฟุ้งชนอื่นๆ รูปที่ 11 เลขนัสเซิลท์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ จากผลการทดลองพบว่าที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Leading มีเลขนัสเซิลท์สูงกว่ากรณีหยุดนิ่งและ Trailing ซึ่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ในส่วนของบริเวณหลังกระแสไหล

(Downstream) ด้าน Leading ยังมีเลขนัสเซิลท์สูงกว่ากรณีหยุดนิ่งอีกด้วย



รูปที่ 10 การกระจายตัวของตัวเลขนัสเซิลท์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อนที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=6D$



รูปที่ 11 เลขนัสเซิลท์ในแต่ละตำแหน่งตามค่า X/D ที่เพิ่มขึ้น ที่ $Y/D=0$ โดยที่ $Re=9,000$ สำหรับระยะฟุ้งชน $L=6D$

5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทฟุ้งชน ผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทฟุ้งชนแฉกเดี่ยวที่มีปากทางออกแบบบอริฟิสในกรณีหยุดนิ่ง ($Ro=0.0$) เมื่อเพิ่มระยะฟุ้งชนที่ $L = 2D, 4D$ และ $6D$ ค่าการถ่ายเทความร้อนจะ



ลดลงตามระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทกับพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เพิ่มมากขึ้น

(2) สำหรับช่องการไหลที่หมุนด้วยค่าตัวเลขการหมุน, $Ro=0.0046$ ที่ระยะพุ่งชน $L=2D, 4D$ และ $6D$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้าน Leading สูงที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นผิวด้าน Trailing และกรณีหยุดนิ่ง มีเพียงที่ระยะพุ่งชน $L=2D$ เท่านั้นที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้าน Trailing ให้ค่าใกล้เคียงกับ Leading

(3) การถ่ายเทความร้อนที่ระยะพุ่งชน $L=2D, 4D$ และ $6D$ ที่บริเวณก่อนกระแสไหล (Upstream) ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าบริเวณหลังกระแสไหล (Downstream) อันเนื่องมาจากผลของกระแสไหลตัดเนื่องจากออกของช่องการไหลมีทางเดียวตรงบริเวณปลายของแขนการหมุน

6 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

7 เอกสารอ้างอิง

[1] Ligrani, P.M. and Mahmood, G.I. (2003), "Variable property Nusselt numbers in a channel with pin fins," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 17, pp. 103–111.

[2] Siddique, W., Khan, N.A. and Haq, I. (2015), "Analysis of numerical results for two-pass trapezoidal channel with different cooling configurations of trailing edge: the effect of dimples," Applied Thermal Engineering, Vol. 89, pp. 763–771.

[3] Chen, Y., Chew, Y.T. and Khoo, B.C. (2013), "Heat transfer and flow structure in turbulent channel flow over protrusions," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 66, pp. 177–191.

[4] Wang, C., Liu, Z.L., Zhang, G.M. and Zhang, M. (2013), "Experimental investigations of flat plate heat pipes with interlaced narrow grooves or channels as capillary structure," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 48, pp. 222–229.

[5] Han, J.C. and Chen, H.C. (2006), "Turbine blade internal cooling passages with rib turbulators," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, pp. 226–248.

[6] Kreith, F. and Margolis, D. (1959), "Heat transfer and friction in turbulent vortex flow," Applied Scientific Research, Vol. 8, pp. 457–473.

[7] Kaewchoothong, N., Maliwan, K., Takeishi, K. and Nuntadusit, C. (2018), "Effect of rotation number on flow and heat transfer characteristics in serpentine passage with ribbed walls," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, pp. 4461–4471.

[8] Elston, C.M. and Wright, L.M. (2015), "Leading Edge Jet Impingement Under High Rotation Numbers." Journal of Thermal Science and Engineering Applications, vol. 120, pp. 368-375.

[9] Chang, W.S. and Yu, K. (2019), "Thermal performance of radially rotating trapezoidal channel with impinging jet-row" International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 136, pp. 246-264.

[10] Yang, L., Tyag, K., Ekkad, S. and Ren, J. (2015), "Influence of Rotation on Heat Transfer in A Two-pass Channel with Impingement Under High Reynolds Number" Turbine Technical Conference and Exposition, June 15-19, Canada.

[11] Pason, J.A., Han, J.C. and Lee, C.P. (1998), "Rotation Effect on Jet Impingement Heat Transfer in Smooth Rectangular Channels With Four Heated Walls and Radially Outward Crossflow" Journal of Turbomachinery, vol. 120, pp. 79-85.

ภาคผนวก จ. บทความสำหรับเผยแพร่ 3

Effect of Rotation number on Heat Transfer Characteristics of a Row of Impinging Jets
in Confined Channel

Effect of Rotation number on Heat Transfer Characteristics of a Row of Impinging Jets in Confined Channel

Open
Access

Thantup Nontula¹, Natthaporn Kaewchoothong¹, Wacharin Kaew-apichai² and Chayut Nuntadusit^{1,3*},

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

³ Energy Technology Research Center (ETRC), Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received XXXX

Received in revised form XXXX

Accepted XXXX

Available online XXXX

Jet impingement has been applied for internal cooling in gas turbine blades. In this study, heat transfer characteristics of impinging jets from a row of circular orifices were investigated inside a flow channel with rotations. The Reynolds number (Re) based on the jet mean velocity was fixed at 6,700. Whereas, the rotation number (Ro) of a channel was varied from 0 to 0.0099. The jet-to-impingement distance ratio (L/D_j) and jet pitch ratio (P/D_j) were respective 2 and 4, D_j is a jet diameter of 5 mm. The thermochromic liquid crystals (TLCs) technique was used to measure the heat transfer coefficient distributions on an impingement surface. The results show that heat transfer enhancement on a jet impingement surface depended on the effects of crossflow and Coriolis force. The local Nusselt number at $X/D_j \leq 20$ on the leading side (LS) was higher than on the trailing side (TS) while heat transfer on the LS at $20 \leq X/D_j \leq 40$ gained the lowest, compared to on the TS . The average Nusselt number ratios (\bar{Nu}_{Ro}/\bar{Nu}_s) on the TS at $Ro = 0.0049$ gave higher than on the LS of around 2.17%. On the other hand, the \bar{Nu}_{Ro}/\bar{Nu}_s on the TS at $Ro = 0.0099$ was less than the LS of about 0.08%.

Keywords:

Impinging jets

Rotation number

Heat transfer

Thermochromic liquid crystals

Copyright © 2019 PENERBIT AKADEMIA BARU - All rights reserved

1. Introduction

Currently, the trend of the gas turbine industry requires to increase the thermal efficiency of the engine to decrease fuel consumption and environmental impact. One of the methods is increasing the turbine inlet temperature (TIT), which will go up to about 1,700-1,800 °C in the future. However, the turbine blade still has limited by the melting point temperature of the material. Therefore, it is essential to have effective cooling technology to reduce the damage of the blades. Several cooling technologies in the past [1-8] have been adopted in a turbine blade to

* Corresponding author. Tel.: 0-7428-7035 ; Fax. 0-7455-8830
E-mail address: chayut.n@psu.ac.th (C.Nuntadusit).

increase heat transfer for both the internal and external blades, such as pin-fin cooling, rib-serpentine cooling, dimple cooling, film cooling, Etc., as shown in Fig. 1.

Jet impingement is one of several cooling techniques applied in the gas turbine blade. It gives a high cooling rate in the impingement region. Recently, a single modified jet has been investigated for heat transfer enhancement by Kaewchoothong et al. [9], and Nuntadusit et al. [10], who used the air augmented duct to increase the heat transfer rate on an impingement surface at a diameter of air augmented duct ratio (D/d_j) of 2.0, 3.3, 4.0, and 6.0 where d_j is an inner diameter of jet. They reported that the heat transfer rate for the case of $D/d_j = 6$ gave the largest by getting 25.42% higher compared to a conventional impinging jet. Many researchers [11-13] in the past also studied for multiple impinging jets on a large surface. San et al. [11] studied the effect of jet-to-jet spacing on heat transfer for staggered arrays of impinging jets. They conducted at the Reynolds number (Re) of 10,000 to 30,000 and jet-to-jet spacing of 4 to 24. The crossflow has a strong effect on heat transfer reduction. Then, Esposito [12] investigated heat transfer distributions of impinging jet arrays with two different types, viz., corrugated wall, and extended ports. They concluded that both geometries reduce the crossflow induced degradation on downstream jets while the individual geometries perform better at different Reynolds numbers. Geers et al. [13] evaluated the correlation of heat transfer for hexagonal and in-line arrays of impinging jets at $Re = 5,000$ to 20,000 using thermochromic liquid crystals (TLCs) method. It was found that multiple-jet heat transfer is strongly influenced by jet interactions before and after the impingement.

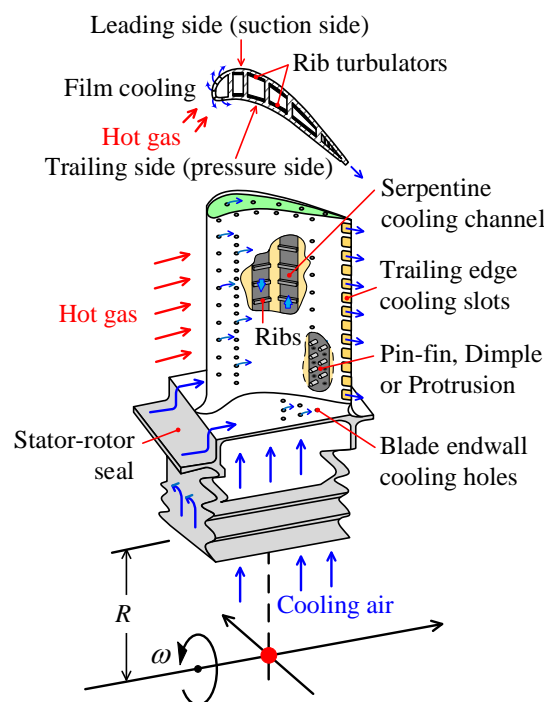


Fig. 1. Cooling technologies of a turbine blade in the past [8].

Additionally, the jet impingement cooling has been adopted in the rotating conditions for the rotor blade, required to remove the heat from the internal blade wall. Elston and Wright [14] studied the effect of rotation on heat transfer characteristics of jet impingement cooling in a channel using the thermocouples. They performed under the jet Reynolds number of 6,000 to 24,000, and the jet rotation number in the range of 0.0 to 0.13. They found that the deflection of the impinging jets by crossflow combined with the rotation induced secondary flows, increased mixing in the impingement cavity, and enhanced the heat transfer. Parsons and Han [15]

investigated the heat transfer of an in-line circular jet array in twin channels under rotations. The jet rotation number varied from $Ro = 0.0$ to 0.0028 and the Reynolds number varied from $5,000$ to $10,000$. They concluded that the rotation could increase the heat transfer rate by up to about 15% when compared to stationary conditions. Recently, the effect of rotation on heat transfer for a single row jet array with crossflow was studied by Lamont et al. [16], who performed at the jet-to-impingement surface distance (L/D_j) of 1 , 2 , and 3 under the rotational speed of 0 to 275 rpm. They found that the heat transfer rate at $L/D_j = 3$ gave the highest heat transfer for a stationary case while the rotation cases provided the highest heat transfer at $L/D_j = 2$. Yang et al. [17] studied the influence of rotation on heat transfer in a two-pass channel with impinging jets under Re of $25,000$ to $100,000$. It was found that the heat transfer on both sides of the jet impingement increased up to about 25% due to the Coriolis acceleration effect. Chang and Yu [18] evaluated the thermal performance of radially rotating trapezoidal channels with impinging jets at $Re = 5,000$ to $17,500$ and $Ro = 0.0$ to 0.3 using a thermal infrared camera. They found that The thermal performance (TPF) values at $Ro = 0.0$ were decreased by increasing Re while All the TPF values were increased by increasing Ro for all Reynolds numbers.

As mentioned above, although several studies about jet impingement under rotations have been explored, the experimental study still limited to gain the full heat transfer surface for rotating jet impingement. Using the thermochromic liquid crystals (TLCs) method measured in detail to gain the heat transfer coefficient surface was rarely reported. Therefore, the objective of this research aims to study the heat transfer distribution characteristics of impinging jets from a row of circular orifices under rotations. In this study, the thermochromic liquid crystals (TLCs) technique was used to evaluate the heat transfer coefficient on the impingement surface on the leading and trailing side surface. The Reynolds number (Re) and rotation number (Ro) based on jet mean velocity were $6,700$ and $0.0-0.0099$, respectively, while the jet-to-impingement distance ratio was fixed at $L/D_j = 2$.

2. Experimental apparatus and method

2.1 Experimental model and its parameters

Fig. 2 shows the details of a single-row jet impingement channel with a crossflow effect. The impingement channel has 370 mm length (L_t) and 20 mm width (W). It has one outlet at the end of the channel, which generates an effect of the crossflow. The number of jet orifices was 13 , which was fixed at pitch-to-jet diameter ratio of $P/D_j = 4$. All of the jet orifices have the same diameter (D_j) of 5 mm. The jet-to-impingement distance ratio was fixed at $L/D_j = 2$. The heat transfer investigation in this study was considered in the range from the 2^{nd} to 11^{th} orifice jet. For the heat transfer measurement on leading and trailing sides, the rotating direction of the test section was altered clockwise and counter-clockwise as presented in Fig. 3. The rotation number was evaluated at $Ro = 0.0$, 0.0049 , and 0.0099 , which covers the range of rotating gas turbine engines in the range of $Ro = 0.0$ to 0.05 for the impinging jet cooling. Besides, the crucial parameters investigated in this research were concluded in Table 1. All experimental measurements have been considered at a constant Reynolds number (Re) of $6,700$ based on the jet mean velocity.

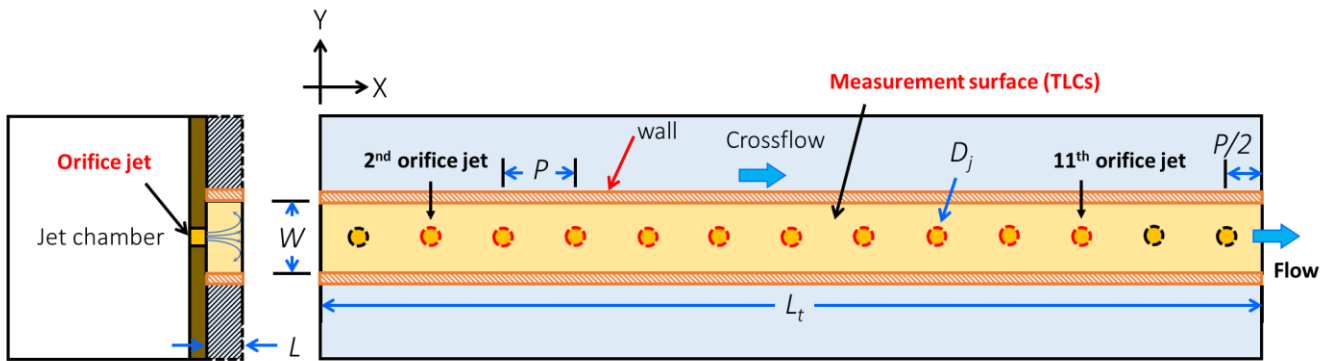


Fig. 2. Single-row jet impingement details used in this study.

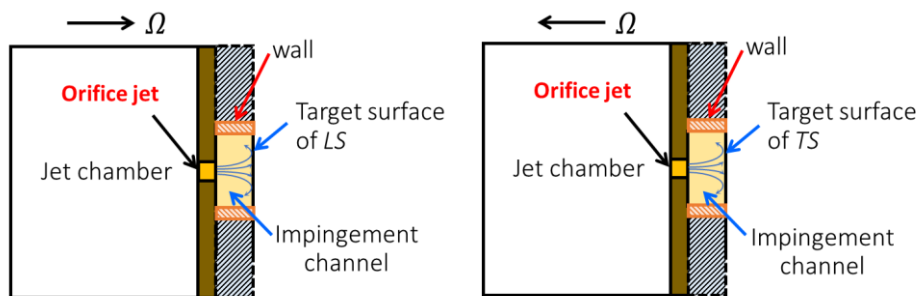


Fig. 3. The direction of a test section evaluated in this work.

Table 1

The important parameters for this study

Parameters and symbol	Values
Jet Reynolds number, Re	6,700
Rotation number, Ro	0.0, 0.0049, and 0.0099
Number of jets, n	13
The diameter of a jet, D_j	5.0 mm
Jet-to-impingement surface distance ratio, L/D_j	2
Jet pitch ratio, P/D_j	4

2.2 Experimental setup

The test rig for the impinging jets in the rotating channel was supported by a 1.5 m x 1.5 m x 1.65 m steel frame, as shown in Fig. 4. It was composed of three crucial parts, viz., the rotating part, the heat flux supplied part, and the air supplied part.

For the rotating part, a test section was placed on one side of a rotating arm and balanced by a counterweight on the opposite side. The rotating arm was installed with a hollow central shaft that had an outside diameter (OD) of 80 mm and an inner diameter (ID) of 65 mm. The hollow main shaft was held by two bearing supports and one rotary seal. The 2-inch rotary seal was connected with a hollow central shaft for supplied air due to rotations. A 7.46 kW electric motor controlled by inverter was used to drive the rotating arm via V-belt. The rotation speed of a test section was recorded from a digital encoder.

For the generated and supplied heat flux part, a slip ring that had an OD of 120 mm and a width of 92 mm was located on the hollow central shaft. Two contacts of the slip ring were made of copper, which can conduct electric current. Besides, the outer part of a slip ring was contacted with two carbon conductors that connected to the DC power supply to generate constant heat flux on the heat transfer surface in the test section.

For the air supplied part, a 2.24 kW blower was controlled by an inverter to adjust the airflow rate, and it was also set to supply air jets into the test section. The air jet temperature was controlled by a temperature controller unit and monitored by a datalogger via thermocouples type T. The orifice flow meter was used to measure the flow rate of air jets.

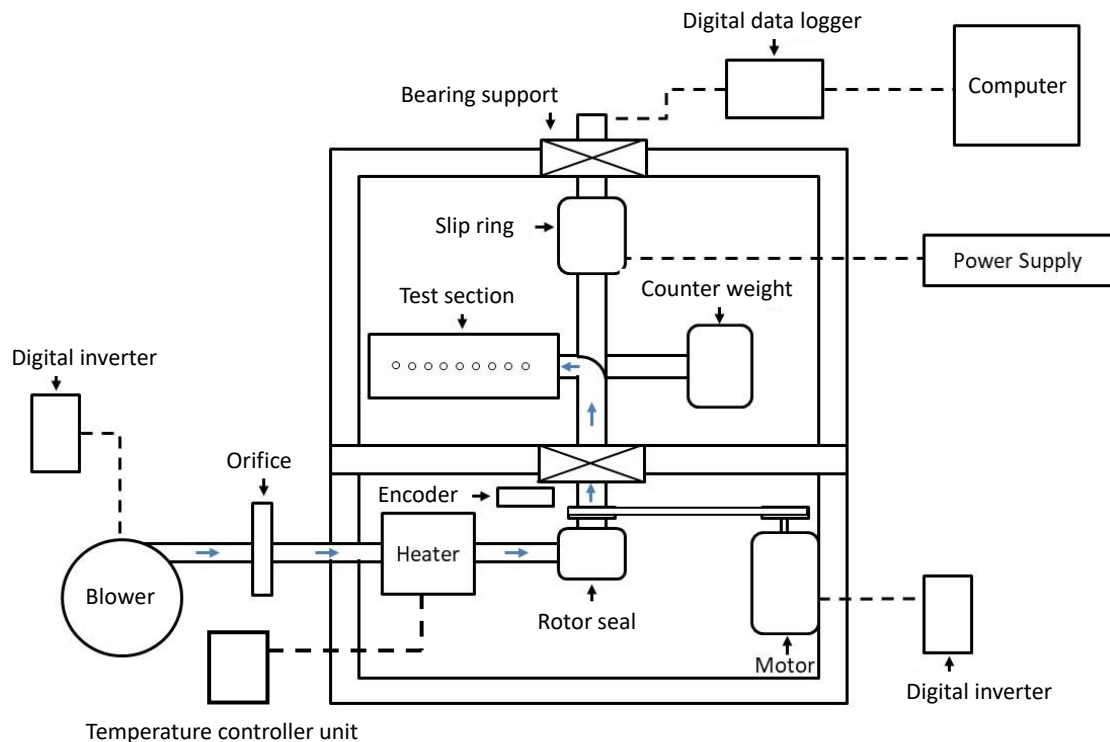


Fig. 4. Experimental setup of the rotating test rig.

2.3 Test section

A test section of heat transfer measurement in this study is shown in Fig. 6. It has 370 mm length (L_t), 100 mm width (W_t), and 67 mm height (H_t). The test section was located at the mean rotating radius-to-jet diameter ratio (R_m/D_j) of 67, which can rotate both clockwise and counterclockwise. In this experiment, the heat transfer surface having a 90 mm width and a 280 mm length was made of a stainless foil (SUS304) at 0.03 mm thick. Stainless foil sheet provides a constant uniform heat flux of about 750 W/m^2 on the heat transfer surface, the electric current at 40 A from a DC power supply was delivered to the stainless foil sheet through a slip ring and two copper bus bars that were positioned on both ends of the stainless-steel sheet and acrylic plate. The thermochromic liquid crystals (TLCs) sheet attached to the rear side of the heat transfer surface was used to measure the temperature distributions via a CCD camera attached on the test section. The measured range of TLCs temperature was $30\text{-}35^\circ\text{C}$ [19, 20].

Before experiments, the relationship between hue (colour data) and temperature of TLCs on the surface was calibrated to ensure reasonable accuracy, which shown in Fig. 7. All data were kept by a digital data logger via a T-type thermocouple, which recorded in incremental steps of about 0.2

°C. When the TLCs colour or temperature on the rear side of the impingement surface reached a steady-state, the TLCs colour pattern was recorded via the CCD camera, which was placed over the test section. Then, the thermal image data on the TLCs sheet was transformed from RGB (Red, Green, and Blue) colour system to hue information. In addition, the image processing method was used to evaluate the temperature and then calculated the heat transfer coefficient.

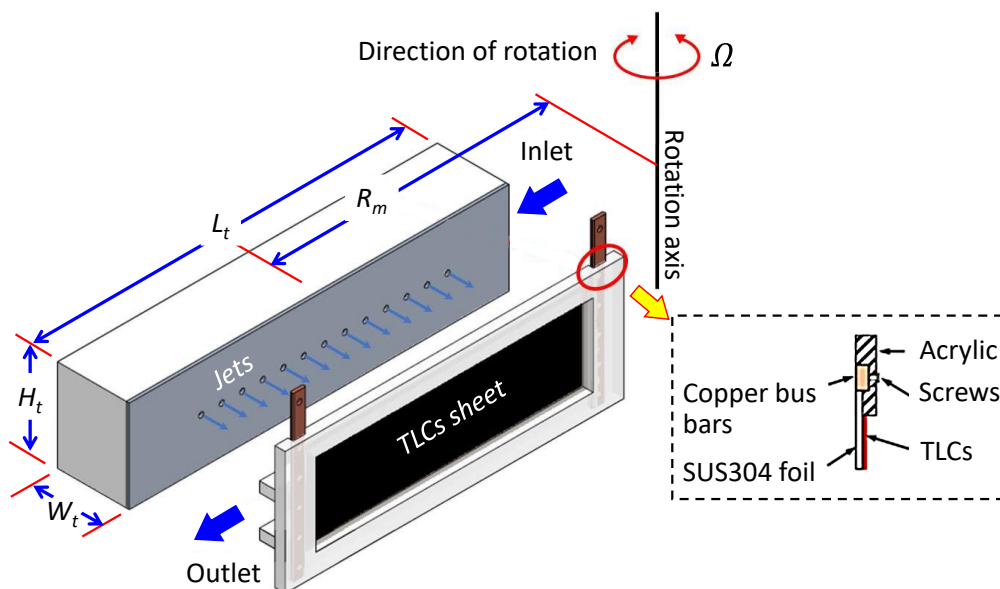


Fig. 6. Details of the test section used for measurement.

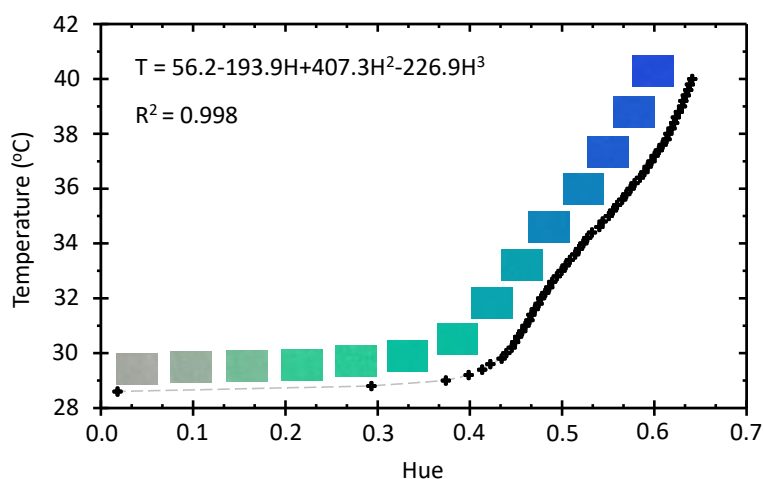


Fig. 7. The calibration curve between hue and temperature values with the developed calibration equation.

3. Data reduction

The air was used for working fluid in the experiment. All experimental tests of single-row jet impingement channel under rotations were conducted at the Reynolds number (Re) of 6,700 based on the mean velocity (V_m) of jet flow and the jet diameter (D_j)

$$Re = \frac{V_m D_j}{\nu} \quad (1).$$

The rotation speed was normalized in term of rotation number (Ro), which can calculate from:

$$Ro = \frac{\Omega D_j}{V_m} \quad (2)$$

where Ω is the rotating speed of a test section, which is performed at the rotational speed of 0-400 rpm at constant $Re = 6,700$.

The local heat transfer coefficient (h) on the heat transfer surface can be determined from

$$h = \frac{\dot{q}_{net}}{(T_w - T_m)} \quad (3)$$

where \dot{q}_{net} is the net heat flux, which can calculate from Eq. (4). T_w is the wall temperature and T_m is the mean temperature, which can calculate from Eq. (5).

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{input} - (\dot{q}_{rad,loss} + \dot{q}_{conv,loss}) \quad (4)$$

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (5)$$

The heat flux generated on the stainless foil is represented by \dot{q}_{in} , which is evaluated from

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (6)$$

$$\dot{q}_{rad,loss} = \sigma \varepsilon_{TLC} (\bar{T}_w^4 - \bar{T}_{surr}^4) \quad (7)$$

$$\dot{q}_{conv,loss} = h_c (\bar{T}_w - \bar{T}_{surr}) \quad (8)$$

where I is the supplied electric current, V is the measured voltage, and A is the area of the heat transfer surface. \dot{q}_{rad} and \dot{q}_{conv} are the heat loss from radiation and convection from TLCs to the surrounding, respectively, σ is the Stefan-Boltzmann constant, ε_{TLC} is the emissivity coefficient for the TLC sheet which was 0.9 [19, 20], T_{in} and T_{out} are respective the inlet and outlet temperature of the air, T_{out} is the room temperature, h_c is the natural heat transfer coefficient that was arranged for a vertical plate.

Finally, the local Nusselt number (Nu) can determine from

$$Nu = \frac{h D_j}{k} \quad (9)$$

where k is the thermal conductivity at the mean air temperature.

The uncertainty values due to measurements of this experiment were less than 4.2% for the Reynolds number and 3.8% for the Nusselt number evaluated according to Moffat [21].

4. Results and discussion

4.1 Contour and local Nusselt number

Comparison of Nusselt number contours on impingement surface for leading (*LS*) and trailing sides (*TS*) at different rotation number at $Ro = 0.0, 0.0049, 0.0099$ is shown in Fig. 9 for case of jet-to-impingement surface distance $L/D_j = 2$ and $Re = 6,700$. The results show that the Nusselt number distributions for all Ro cases decrease from 2nd jet to 11th jet, while the local Nusselt number in the case of $Ro = 0.0049$ and 0.0099 significantly decreases when compared to the case of stationary at $Ro = 0.0$.

Due to the effect of crossflow, the local Nusselt number for 4th jet to 11th jet decrease as going downstream and the peak of local Nusselt number shifted to downstream more for the jet at downstream. This causes by the impinged jet flow along the channel and becomes crossflow to the impinging jet downstream. The jet flow was deflected by the crossflow before impinging on the surface. As going downstream, the effect of crossflow become more robust, and the jet flow was deflected and interacted with crossflow before impinging on the surface. The momentum of jet impinged on surface reduced and resulted in a lower Nusselt number in the downstream region.

It is also found that the impinging jet near the outlet of the flow channel (9th jet to 11th jet) provides a high local Nusselt number in the impingement region again. This may be due to the crossflow interacted with the jet flow and promoted the turbulent intensity of jet before impinging, which was also explained noticeably for the case of low jet-to-impingement surface distance in previous similar research [16]. The effect of rotations also increases the heat transfer significantly in the trailing surface (*TS*) when compared with the leading surface (*LS*) due to the Coriolis and centrifugal acceleration effects. However, those sides still show lower than in the case of stationary (*ST*) for large areas.

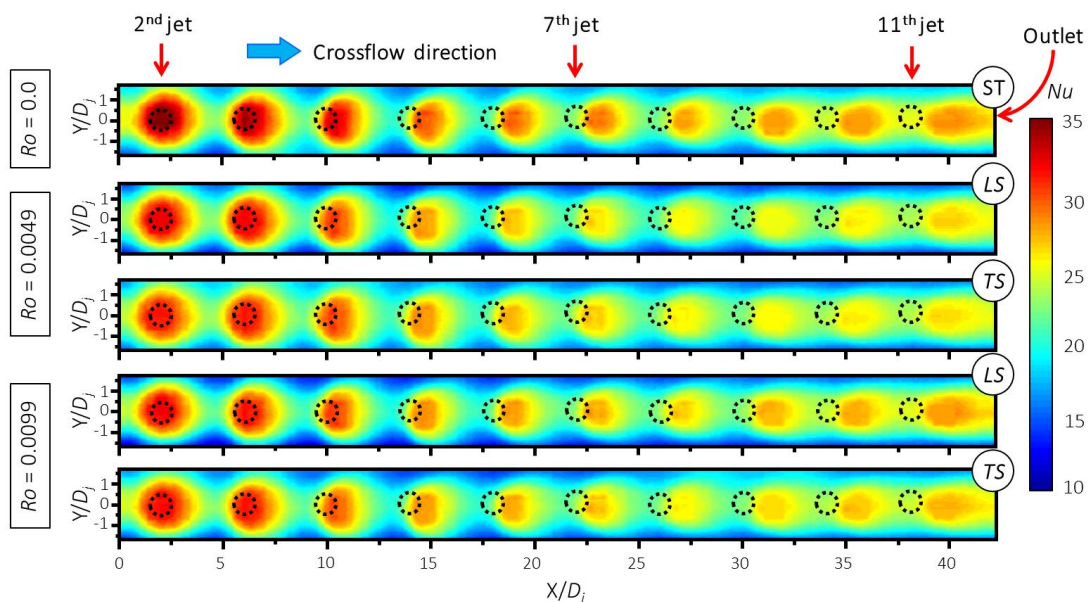


Fig. 9. The Nusselt number distributions on measurement surface of impinging jet both leading (*LS*) and trailing sides (*TS*) at $Ro = 0.0, 0.0049, 0.0099, L/D_j = 2$ and $Re = 6,700$.

Fig. 10 shows the local Nusselt number ratio (Nu_{Ro}/Nu_s) along the centre of the channel (along X-axis and $Y/D_j = 0$), here Nu_s is the local Nusselt number for a stationary case. This figure indicates the effect of rotation on the local Nusselt number. It is found that the local Nusselt number ratio gradually decreases as going downstream due to the crossflow effect. The local heat transfer on the leading side (LS) in the region of $0 \leq X/D_j \leq 20$ is higher than on the trailing side (TS) while heat transfer on the leading side (LS) in the region of $20 \leq X/D_j \leq 40$ shows lowest when compared to on the trailing side (TS). This is due to the Coriolis acceleration effect. The Coriolis force affected strongly in the region of $30 \leq X/D_j \leq 40$. It destroys the thermal boundary layer on the TS better than on the LS.

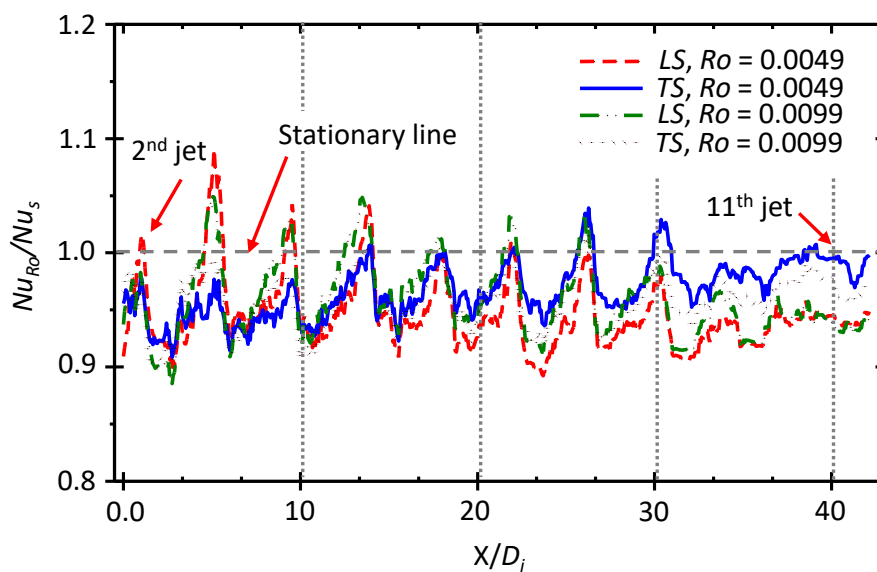


Fig. 10. The local Nusselt number ratio (Nu_{Ro}/Nu_s) on the impingement surface along X-axis ($Y/D_j = 0$) at $Re = 6,700$

4.2 Average Nusselt number

Fig. 11 demonstrates the average Nusselt number ratios ($\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$) on measurement surface along X-axis at $Re = 6,700$. The average Nusselt number was calculated along the X-axis ($Y/D_j = 0$) of the heat transfer surface. The results show that all cases of rotations give the $\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$ lower than a stationary case. The $\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$ on the leading side (LS) at $Ro = 0.0049$ ($N = 200$ rpm) is the lowest of about 5.51% when compared with stationary. Subsequently, less than 3.41%, 4.47%, and 4.39% of the trailing side (TS) at $Ro = 0.0049$, the LS and TS at $Ro = 0.0099$ ($N = 400$ rpm), respectively. For $Ro = 0.0049$, above 2.17% of the $\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$ on the TS is higher than on the LS while the $\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$ on the TS for $Ro = 0.0099$ differs from the LS of about 0.08%.

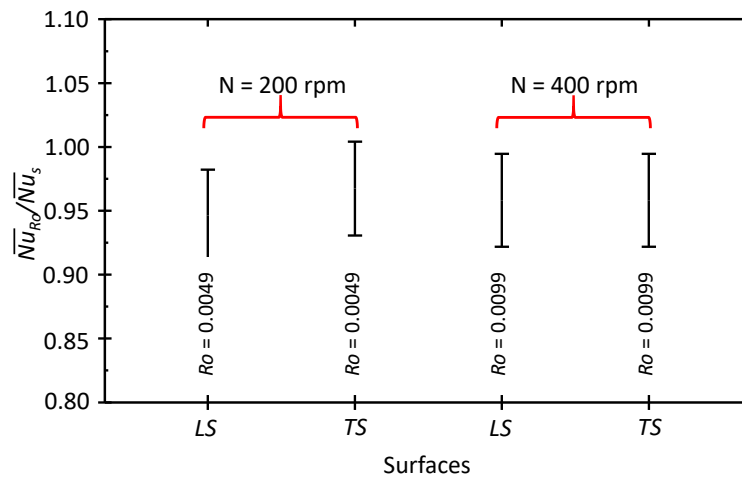


Fig. 11. The average Nusselt number ratio ($\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$) on measurement surface along X-axis ($Y/D_j=0$) at $Re = 6,700$.

5. Conclusions

The primary purpose of this research was to study the effect of rotation number on heat transfer characteristics of a row of impinging jets from circular orifices in a confined channel. All experimental results can be summarized as follow:

1. Effect of crossflow and Coriolis/centrifugal forces leads to the heat transfer coefficient due to the rotational effect increases significantly near the outlet of the channel when compared with the stationary channel, while heat transfer near the 2nd jet area gives the highest heat transfer.
2. The local Nusselt number on the leading side (LS) at $0 \leq X/D_j \leq 20$ is higher than on the trailing side (TS) while heat transfer on the LS at $20 \leq X/D_j \leq 40$ is the lowest when compared to on the TS. This is due to the Coriolis acceleration effect.
3. The average Nusselt number ratios ($\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$) on the TS at $Ro = 0.0049$ are about 2.17% higher than on the LS while the $\overline{Nu}_{Ro}/\overline{Nu}_s$ on the TS for $Ro = 0.0099$ differs from the LS of about 0.08%.

Acknowledgment

This research was funded by a grant from the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Thailand.

References

- [1] Ligrani, P.M. and Mahmood, G.I. "Variable property Nusselt numbers in a channel with pin fins." *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 17, (2003): 103–111.
- [2] Siddique, W., Khan, N.A., and Haq, I. "Analysis of numerical results for two-pass trapezoidal channel with different cooling configurations of trailing edge: the effect of dimples." *Applied Thermal Engineering* 89, (2015): 763–771.
- [3] Chen, Y., Chew, Y.T., and Khoo, B.C. "Heat transfer and flow structure in turbulent channel flow over protrusions." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 66, (2013): 177–191.
- [4] Wang, C., Liu, Z.L., Zhang, G.M., and Zhang, M., "Experimental investigations of flat plate heat pipes with interlaced narrow grooves or channels as capillary structure." *Experimental Thermal and Fluid Science* 48, (2013): 222–229.
- [5] Kreith, F. and Margolis, D., "Heat transfer and friction in turbulent vortex flow." *Applied Scientific Research* 8, (1959): 457–473.
- [6] Han, J.C., and Chen, H.C., "Turbine blade internal cooling passages with rib turbulators." *Journal of Propulsion and Power* 22, (2006): 226–248.

- [7] Chupp, R.E., Helms, H.E., McFadden, P.W., and Brown, T.R., "Evaluation of Internal Heat-Transfer Coefficients for Impingement-Cooled Turbine Airfoils." *Journal of Aircraft* 6, (1969): 203–208.
- [8] Kaewchoothong, N., Maliwan, K., Takeishi, K., and Nuntadusit, C., "Effect of rotation number on flow and heat transfer characteristics in serpentine passage with ribbed walls." *Journal of Mechanical Science and Technology* 32, (2018): 4461–4471.
- [9] Kaewchoothong, N., Wae-Hayee, M., Vessakosol, P., Niyomwas, B. and Nuntadusit, C., "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Expansion Pipe Nozzle with Air Entrainment Holes." *Advanced Materials Research* 931–932, (2014): 1213–1217.
- [10] Nuntadusit, C., Wae-hayee, M. and Kaewchoothong, N., "Heat transfer enhancement on a surface of impinging jet by increasing entrainment using air-augmented duct." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 127, (2018): 751–767.
- [11] San, J.Y. and Lai, M.D., "Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44, (2001): 3997–4007.
- [12] Esposito, E.I., "Jet impingement cooling configurations for gas turbine combustion." Thesis of Master in Mechanical Engineering, Louisiana State University (2006).
- [13] Geers, L.F.G., Tummers, M.J., Bueninck, T.J. and Hanjalic, K., "Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, (2008): 5389–5399
- [14] Elston, C.M. and Wright, L.M., "Leading Edge Jet Impingement Under High Rotation Numbers." *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* 120, (2015): 368–375.
- [15] Pason, J.A., Han, J.C. and Lee, C.P., "Rotation Effect on Jet Impingement Heat Transfer in Smooth Rectangular Channels With Four Heated Walls and Radially Outward Crossflow." *Journal of Turbomachinery* 120, (1998): 79–85.
- [16] Lamont, J.A., Ekkad, S.V. and Alvin, M.A., "Effects of Rotation on Heat Transfer for a Single Row Jet Impingement Array With Crossflow." *ASME Journal of Heat Transfer* 134, (2012): 082202.
- [17] Yang, L., Tyag, K., Ekkad, S. and Ren, J., "Influence of Rotation on Heat Transfer in A Two-pass Channel with Impingement Under High Reynolds Number." *Turbine Technical Conference and Exposition*, June 15-19, Canada (2015).
- [18] Chang, W.S. and Yu, K., "Thermal performance of radially rotating trapezoidal channel with impinging jet-row." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 136, (2019): 246–264.
- [19] Kaewchoothong, N., Maliwan, K., Takeishi, K. and Nuntadusit, C., "Effect of inclined ribs on heat transfer coefficient in stationary square channel." *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 7, (2017): 344–350.
- [20] Kaewchoothong, N., Narato, P. and Nuntadusit, C., "Experimental investigation of the heat transfer characteristics and thermal performance inside a ribbed serpentine channel during rotational effects." *Experimental Thermal and Fluid Science* 111, (2020): 109973.
- [21] Moffat, R.J., "Describing the uncertainties in experimental results." *Experimental Thermal and Fluid Science* 1, no. 1 (1988): 3–17.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	ฐานทัพ นนท์ตุลา		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	6210120034		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2562	

ทุนการศึกษา

ทุนการศึกษาโครงการปริญญาตรี-โท 5 ปี

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

(1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ฐานทัพ นนท์ตุลา, ณัฐพร แก้วชูทอง และ ชยุต นันทดุสิต. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในช่องการไหลที่หมุน. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 19, จังหวัดจันทบุรี, 2563.

ฐานทัพ นนท์ตุลา, ณัฐพร แก้วชูทอง และ ชยุต นันทดุสิต. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของช่องการไหลที่หมุนด้วยเจ็ทพุ่งชนแถวเดียว. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34, จังหวัดประจวบคีรีขันธ์, 2563.

(2) บทความวิชาการ (Journal paper)

Thantup Nontula, Natthaporn Kaewchoothong, Wacharin Kaew-apichai and Chayut Nuntadusit, 2020. "Effect of Rotation number on Heat Transfer Characteristics of a Row of Impinging Jets in Confined Channel", Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Vol. 77.