



การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทไหลปะทะ
ร่วมกับตัวสร้างกระแสมุขวนชนิดปีก

**Heat Transfer Enhancement on a Surface by Using Jet Impingement
Combined with Wing-type Vortex Generators**

รัตนากรณ์ ปานสังข์

Rattanakorn Pansang

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**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์


ชื่อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทไหลปะทะ
ร่วมกับตัวสร้างกระแสหมุนวนชนิดปีก

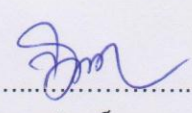
ผู้เขียน นายรัตนกรรณ์ ปานสังข์

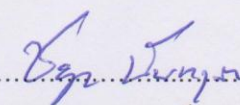
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

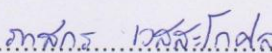
คณะกรรมการสอบ

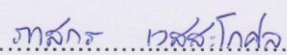

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดูลิต)

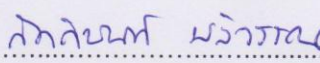

.....ประธานกรรมการ
(ดร.จันทนา ตักดี เทพญา)

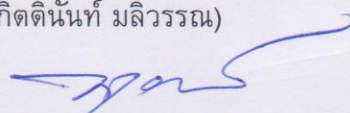

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดูลิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


.....กรรมการ
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)


.....
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)


.....กรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ..... *ดร. ชยุต นันทดุสิต*
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ..... *ศาสตราจารย์ ดร. ภาสกร เวสสะโกศล*
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ..... *รัตนากรณ์ ปานสังข์*
(นายรัตนากรณ์ ปานสังข์)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายรัตนากรณ์ ปานสังข์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทไหลปะทะร่วมกับตัวสร้างกระแสหมุนวนชนิดปีก
ผู้เขียน	นายรัตนากรณ์ ปานสังข์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว งานวิจัยแบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกเป็นการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุโมงค์ลมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดความเร็วของกระแสไหลตัดที่ $V_c=2.14$ m/s ($Re_c=6,600$), 3 m/s ($Re_c=9,300$) และ 5 m/s ($Re_c=15,500$) และทำการเปรียบเทียบผลกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน ส่วนที่สองเป็นการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวภายในอุโมงค์ลมที่มีเจ็ทแถวพุ่งชนจำนวน 4 ลำ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทกำหนดให้คงที่ที่ $Re_j=13,400$ (15 m/s) และปรับอัตราส่วนความเร็ว (ความเร็วเจ็ทต่อความเร็วกระแสไหลตัด) ที่ $VR=3$ ($V_c=5$ m/s), 5 ($V_c=3$ m/s) และ 7 ($V_c=2.14$ m/s) ส่วนที่สามเป็นการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวภายในช่องการไหลที่มีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนจำนวน 4×6 ลำ โดยปรับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทให้อยู่ในช่วง $Re_j=5,000, 7,500, 10,000, 13,400, 15,000$ และ $20,000$ ในการทดลองทั้งหมดได้กำหนดระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D$ เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ริฟิสเท่ากับ 13.2 mm การจัดเรียงของเจ็ทเป็นแบบแถวตรงที่มีระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=3D$ สำหรับมุมปะทะ (มุมระหว่างแกนหลักของปีกสร้างกระแสหมุนวนต่อทิศทางการไหลของกระแสไหลตัด) ได้ปรับให้อยู่ในช่วง $\theta=30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ในการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกคลิควิดคริสตัลและหาการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS Version 13.0 (Fluent)

ผลของการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่ากระแสไหลตัดถูกกระแสหมุนวนด้านหลังปีกดึงและไหลหมุนวนปะทะบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลทำให้บริเวณดังกล่าวมีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) นัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่ากรณีอื่นๆ โดยที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ, 45^\circ$ และ 60° มีค่าเพิ่มขึ้น 58.39%, 64.10% และ 53.10% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน

ผลของการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชนพบว่า ที่กระแสไหลตัดมีความเร็วต่ำ ($VR=7$) ผลของการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนช่วยลดการปะทะระหว่างกระแสเจ็ทและกระแสไหลตัด ทำให้เจ็ทสามารถพุ่งชนพื้นผิวได้รุนแรงขึ้น ส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนจะช่วยดึงกระแสไหลตัดเข้ามาผสมกับลำเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ส่งผลทำให้เนสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่ากรณีอื่นๆ โดยที่ $VR=3$ เนสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° เพิ่มขึ้น 28.58%, 32.49% และ 35.73% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทแฉวพุ่งชนที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน

ผลของการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพบว่า การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนช่วยลดการปะทะระหว่างกระแสไหลตัดและเจ็ทพุ่งชน ทำให้เจ็ทสามารถพุ่งชนพื้นผิวได้รุนแรงขึ้น และยังพบว่าเจ็ทบริเวณปลายทางการไหลมีการไหลปะทะบริเวณด้านหน้าปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° และเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ $Re=13,400$ ให้เนสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 7.17%, 12.91% และ 6.61% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน

Thesis Title	Heat Transfer Enhancement on a Surface by Using Jet Impingement Combined with Wing-type Vortex Generators
Author	Mr. Rattanakorn Pansang
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2014

ABSTRACT

The aim of this research is to enhance the heat transfer rate on the impingement surface by using impinging jets combined with vortex generator wings. In this research, the effects of the angle between attacking angles of the vortex generator wings was investigated at different attacking angles, defined as the major axis of elongated orifice and the cross-flow direction. The attacking angle at $\theta=30^\circ$, 45° and 60° were studied. In this study, the jet-to-plate distance was fixed at $H=2D$. The orifice diameter (D) was 13.2 mm. The studies were separated into three parts. In the first part, the wing vortex flow was mounted on the surface of the heat transfer. The velocity of cross-flow was varied at $V_c=2.14$ m/s ($Re_c=6,600$), $V_c=3$ m/s ($Re_c=9,300$) and $V_c=5$ m/s ($Re_c=15,500$). In the second part, a row of 4 of impinging jets impinge on inner surface of wind tunnel under the effect of a simulated cross-flow. The Reynolds number of jet was fixed at $Re_j=13,400$. Velocity ratios (jet velocity/cross-flow velocity) were varied at $VR=3$, 5 and 7. In the third part, array of impingement jet with 4×6 jets with inline arrangement configurations was studied. The jet-to-jet distance was fixed at $S=3D$. The Reynolds number of jet was also varied at $Re_j=5,000$, 7,500, 10,000, 13,400, 15,000 and 20,000. The local temperature distribution on the impingement surface was measured using Thermochromic Liquid Crystal sheet (TLCs), and the local heat transfer coefficient was evaluated using image processing method. The numerical simulation was employed to understand the behavior of fluid flow.

For the case of mounting wing vortex generators on heat transfer surface, it was found that the vortex occurred can entrain the cross-flow velocity into impingement with on surface heat exchangers. Result in area where the impingement of the cross-flow and surface heat transfers increases. For the high cross-flow velocity ($V_c=5$ m/s), the average Nusselt number is high. It found that, when installing the wing vortex generates attacking angles $\theta=30^\circ$, 45° and 60° to the percentage increase in the overall average

Nusselt number on surface higher than 58.39%, 64.10% and 53.10% respectively compared to the without the mounted vortex generator wings on the surface.

For the case of mounted wing vortex generators on surface of the jet impingement, It was found that for the low cross-flow ($VR=7$) the installation wing vortex generators serves to block the cross-flow in upstream caused by impinged jet. It was found that for the high cross-flow velocity ($VR=3$) the installation wing vortex generators can entrain the cross-flow the mix with jet flow before the impingement the surface. For the high cross-flow velocity ($VR=3$), the overall average Nusselt number was increased on impingement surface. It is found that when installing the wing generated attacking angles $\theta=30^\circ$, 45° and 60° to the percentage enhancement in the surface higher than 28.58%, 32.49% and 35.73%, respectively when compared to the without the mounted vortex generator wings on the surface.

For the case of mounting wing vortex generators on surface with array of impinging jets, It was found that installation the wing vortex generators serves to block the cross-flow-flow caused to jets impinged on the surface strongly. It was also found that the flow downstream jet impingement flow front wing vortex generates resulted in heat transfer rate increases. For the installation of the wing generates attacking angles $\theta=30^\circ$, 45° and 60° to the percentage enhancement in the surface higher than 7.17%, 12.91% and 6.61%, respectively on the without the mounted vortex generator wings on the surface.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และขอขอบคุณ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่เสนอแนวทางการทำวิจัยและเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ และรองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

รัตนากรณ์ ปานสังข์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย	(5)
บทคัดย่ออังกฤษ	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(14)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(18)
รายการผลงานที่ตีพิมพ์และประชุมวิชาการ	(21)
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	3
1.2.1 บริเวณเจ็ทอิสระ	3
1.2.2 บริเวณเจ็ทพุ่งชน	4
1.2.3 บริเวณเจ็ทผนัง	4
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	11
2.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
3. ขอบเขตของงานวิจัย	12
4. ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย	13
4.1 โมเดลและตัวแปรการทดลอง	13
4.1.1 โมเดลและตัวแปรการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบน พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	13
4.1.2 โมเดลและตัวแปรการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบน พื้นผิวที่เจ็ทแฉกพุ่งชน	14
4.1.3 โมเดลและตัวแปรการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบน พื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ชุดทดลอง	17
4.2.1 ชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน	17
4.2.2 ชุดทดลองสำหรับศึกษาขนาดของเจ็ทแฉวพุ่งชนในกระแสไหลตัด	18
4.2.3 ชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว	18
4.3 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	19
4.4 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล	22
4.5 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ	26
4.6 การตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	26
5. การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	27
5.1 สมการควบคุมการไหล	27
5.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน	28
5.3 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง	30
5.4 โมเดลการจำลองการไหล	31
5.4.1 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน	31
5.4.2 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิว ที่เจ็ทแฉวพุ่งชน	33
5.4.3 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิว ที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	34
5.5 การสร้างกริด	36
5.6 ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ	38
5.7 วิธีการคำนวณ	38
6. ผลการทดลองและอภิปรายผล	39
6.1 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	39
6.1.1 การศึกษาลักษณะการไหลโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	39
6.1.2 ผลการทดลองลักษณะการกระจายของน้ำเชลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.3 น้สเซลล์ต์น้มเบอร์เจลลี่ในแนวขวางการไหลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	46
6.1.4 การเปรียบเทียบน้สเซลล์ต์น้มเบอร์เจลลี่ทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	48
6.2 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน	50
6.2.1 การศึกษาลักษณะการไหลโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	50
6.2.2 ผลการทดลองลักษณะการกระจายของน้สเซลล์ต์น้มเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน	54
6.2.3 น้สเซลล์ต์น้มเบอร์เจลลี่ในแนวขวางการไหลที่เจ็ทแถวพุ่งชน	56
6.2.4 การเปรียบเทียบน้สเซลล์ต์น้มเบอร์เจลลี่ทั้งพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน	58
6.3 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	60
6.3.1 การศึกษาลักษณะการไหลโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	60
6.3.2 ผลการทดลองลักษณะการกระจายของน้สเซลล์ต์น้มเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	68
6.3.3 น้สเซลล์ต์น้มเบอร์เจลลี่ในแนวขวางการไหลที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	71
6.3.4 การเปรียบเทียบน้สเซลล์ต์น้มเบอร์เจลลี่ทั้งพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	72
6.3.5 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนสำหรับกลุ่มเจ็ทพุ่งชน	73
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
7.1 สรุปผลการวิจัย	75
7.1.1 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	75
7.1.2 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน	75
7.1.3 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	76
7.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก ก. บทความสำหรับเผยแพร่ 1	81
ภาคผนวก ข. บทความสำหรับเผยแพร่ 2	89
ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 3	104
ภาคผนวก ง. การคำนวณค่าความไม่แน่นอน	110
ประวัติผู้เขียน	114

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1	รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้าง กระแสนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน 14
ตารางที่ 2	รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้าง กระแสนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน 15
ตารางที่ 3	รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้าง กระแสนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน 16
ตารางที่ 4	การกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไขการคำนวณ 38
ตารางที่ 5	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าไนส์เชิลด์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวและค่าเรย์ โนลด์นัมเบอร์ของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน 74

รายการภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1	การติดแผ่นครีป (Fins) ที่มีกลุ่มของปีกรอบท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	1
รูปที่ 2	การปรับแต่งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	2
รูปที่ 3	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างลำเจ็ทพุ่งชน	3
รูปที่ 4	การเกิดกระแสไหลตัดของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน	3
รูปที่ 5	โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว	4
รูปที่ 6	ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัดของ Bouchez และ Goldstein	6
รูปที่ 7	โมเดลและตัวแปรการทดลองของ Wang และคณะ	6
รูปที่ 8	การจัดเรียงกลุ่มเจ็ทพุ่งชนของ Wae-hayee และคณะ	7
รูปที่ 9	ลักษณะการเกิดกระแสหมุนวนตามแนวขวางการไหลของ Taslim	8
รูปที่ 10	โมเดลและตัวแปรการทดลองของ Biswas และคณะ	9
รูปที่ 11	โครงสร้างการไหลของอากาศผ่านปีกรูปสามเหลี่ยมของ Biswas และคณะ	9
รูปที่ 12	โมเดลและตัวแปรการคำนวณของ Saha และคณะ	10
รูปที่ 13	การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน (Vortex generator wings)	11
รูปที่ 14	เครื่องอุณหอากาศพลงานแสงอาทิตย์	12
รูปที่ 15	โมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	13
รูปที่ 16	โมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉกพุ่งชน	15
รูปที่ 17	โมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	16
รูปที่ 18	รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	17
รูปที่ 19	รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษาขนาดของเจ็ทแฉกพุ่งชนในกระแสไหลตัด	18
รูปที่ 20	รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว	19
รูปที่ 21	รายละเอียดส่วนทดสอบสำหรับการวัดการถ่ายเทความร้อน	19
รูปที่ 22	ชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล	22
รูปที่ 23	การเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ	23
รูปที่ 24	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตัวประกอบเฉดสี Hue	25
รูปที่ 25	กราฟสมการที่ใช้ทำนายอุณหภูมิเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบ	25
รูปที่ 26	การเปรียบเทียบนั้สเชลต์นั้มที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	26

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 27	การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน ณ จุดหนึ่งในสนามการไหล	28
รูปที่ 28	การกระจายความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณชั้นขีดผนัง	30
รูปที่ 29	โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	32
รูปที่ 30	โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน	33
รูปที่ 31	โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	35
รูปที่ 32	รายละเอียดการสร้างกริดกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	36
รูปที่ 33	รายละเอียดการสร้างกริดกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน	36
รูปที่ 34	รายละเอียดการสร้างกริดกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	37
รูปที่ 35	การพิจารณาจำนวนกริดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเจ็ทแฉวพุ่งชน	37
รูปที่ 36	การพิจารณาจำนวนกริดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีกุ่มเจ็ทพุ่งชน	38
รูปที่ 37	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$	39
รูปที่ 38	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=0$	40
รูปที่ 39	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X ต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$	41
รูปที่ 40	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X ต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$	42
รูปที่ 41	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X ต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$	43

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 42	ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	44
รูปที่ 43	ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	45
รูปที่ 44	นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	47
รูปที่ 45	นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	48
รูปที่ 46	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสนวน	49
รูปที่ 47	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$	50
รูปที่ 48	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=0$	51
รูปที่ 49	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ที่ระยะ $X/D=0$	52
รูปที่ 50	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ที่ระยะสูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1.5 mm	53
รูปที่ 51	ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน	55
รูปที่ 52	ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน	56
รูปที่ 53	นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลที่เจ็ทแถวพุ่งชน	57
รูปที่ 54	นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของเจ็ทแถวพุ่งชน	58
รูปที่ 55	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวของเจ็ทแถวพุ่งชนเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทแถวพุ่งชนพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสนวน	59
รูปที่ 56	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ กรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสนวน	61
รูปที่ 57	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$	62
รูปที่ 58	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$	63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 59	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่าง ๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$	64
รูปที่ 60	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$	65
รูปที่ 61	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=0$	65
รูปที่ 62	ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน 1.5 mm	67
รูปที่ 63	ลักษณะการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	68
รูปที่ 64	ลักษณะการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	69
รูปที่ 65	นัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	71
รูปที่ 66	นัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	72
รูปที่ 67	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเปรียบเทียบกับกรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน	73
รูปที่ 68	สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนสำหรับกลุ่มเจ็ทพุ่งชน	74

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์คำย่อ		หน่วย
A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	m^2
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออรัล	m
e	คือ ขนาดความสูงของปีกสร้างกระแสหมุนวน	m
F_1, F_2	คือ Blending function	-
H	คือ ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่ง	m
HSI	คือ องค์ประกอบของระบบสี (Hue, Saturation และ Intensity)	-
h	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
h_c	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
\bar{h}_z	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในแนวขวางการไหล	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
\bar{h}	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งพื้นผิว	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
I	คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส	A
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิ $25^\circ C$	$W/m \cdot ^\circ C$
k	คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)	J/kg
L	คือ ระยะห่างจากปีกสร้างกระแสหมุนวนถึงจุดที่เจ็ทพุ่งชน	m
l	คือ ขนาดความยาวของปีกสร้างกระแสหมุนวน	m
N	คือ จำนวนข้อมูลของความเร็วทั้งหมด	-
Nu	คือ ค่าตัวเลขไนล์ดัมเบอร์ (Nusselt number)	-
\overline{Nu}_z	คือ ค่าตัวเลขไนล์ดัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหล	-
\overline{Nu}	คือ ค่าตัวเลขไนล์ดัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว	-
\dot{q}_{input}	คือ อัตราการเกิดความร้อนบนแผ่นสแตนเลส	W/m^2
\dot{q}_c	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	W/m^2
\dot{q}_r	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน	W/m^2
R	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส	-
Re	คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)	-
Re_c	คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของกระแสไหลตัด	-
Re_j	คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ท	-
RGB	คือ องค์ประกอบของระบบสี (Red, Green และ Blue)	-
S	คือ ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท	m

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

		หน่วย
สัญลักษณ์คำย่อ (ต่อ)		
s	คือ ระยะห่างระหว่างปีกสร้างกระแสมุมวน	m
T_c	คือ อุณหภูมิกระแสไหลตัด	$^{\circ}\text{C}$
T_j	คือ อุณหภูมิของเจ็ท	$^{\circ}\text{C}$
T_s	คือ อุณหภูมิภายในห้องทดลอง	$^{\circ}\text{C}$
T_w	คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล	$^{\circ}\text{C}$
\bar{T}_w	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{T}_{w,z}$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวในแนวขวางการไหล	$^{\circ}\text{C}$
Tu	คือ ระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity)	-
t	คือ ขนาดความหนาของปีกสร้างกระแสมุมวน	m
U_i, U_j	คือ ส่วนประกอบของความเร็วเฉลี่ย	m/s
U_τ	คือ ความเร็วเฉือน (Shear velocity)	m/s
V_i	คือ ความเร็ว ณ เวลาใดๆ	m/s
V_j	คือ ความเร็วที่จุดศูนย์กลางปากทางออกเจ็ท	m/s
V_i'	คือ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใดๆ	m/s
VR	คือ อัตราส่วนความเร็ว (Velocity ratio)	-
W	คือ ขนาดความกว้างของผนังจำกัดการไหล	m
w	คือ ระยะห่างระหว่างปีกสร้างกระแสมุมวน	m
X, Y, Z	คือ ระบบพิกัดฉาก (Cartesian coordinate system)	m
y	คือ ระยะห่างชั้นขีดผนัง	m
y^+	คือ ตัวแปรไร้มิติของระยะห่างชั้นขีดผนัง (Dimensionless wall distance)	-
สัญลักษณ์ตัวย่อ		
α	คือ ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)	$\text{W/m}^{\circ}\text{C}$
β	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนเชิงปริมาตร	K^{-1}
ε	คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Emissivity)	-
θ	คือ มุมปะทะของปีกสร้างกระแสมุมวน (Attack angle)	degree
μ	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ (Dynamic viscosity)	kg/m.s

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

		หน่วย
สัญลักษณ์ตัวย่อ (ต่อ)		
ν	คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ (Kinematic viscosity)	m^2/s
ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Density)	kg/m^3
σ	คือ ค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and Boltzman)	$W/m^2 \cdot K^4$
σ_k	คือ ค่าคงที่ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน	-
σ_ω	คือ ค่าคงที่ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายเฉพาะ	-
สัญลักษณ์ตัวห้อย		
c	คือ กระแสไหลตัด (Cross-flow)	
c	คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)	
i	คือ ค่าของข้อมูล ณ เวลาใดๆ	
j	คือ ท่อเจ็ท (Jet)	
k	คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)	
s	คือ สภาวะอากาศโดยรอบ (Surrounding)	
TLC	คือ แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล	
s	คือ ภาวะอากาศโดยรอบ (Surrounding)	
t	คือ เวลา (Time)	
w	คือ ผนัง (Wall)	

รายการผลงานที่ตีพิมพ์และการประชุมวิชาการ

(1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

รัตนากรณี ปานสังข์, มัทตาร์ แวะหะยี, ภาสกร เวสสะโกศล และ ชยุต นันทดุสิต
2557 การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนร่วมกับตัวสร้าง
กระแสมุขวน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10, 4-6 มิถุนายน
2557, ม.สงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

Pansang, R., Wae-hayee, M., Vessakosol, P., and Nuntadusit, C., (2014),
“Heat Transfer Enhancement for Row of Impinging Jets in Cross-flow with some Baffle
Attachments”, The 15th International Heat Transfer Conference 2014 (IHTC-15), August
10-15, 2014, Kyoto, Japan

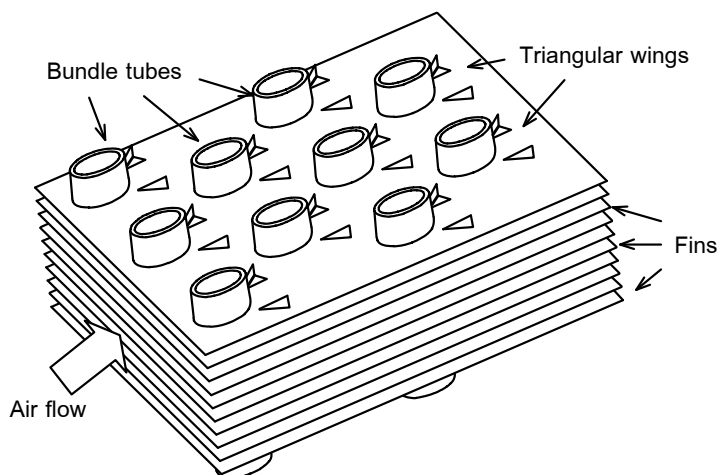
(2) บทความวิชาการ (Journal paper)

Pansang, R., Wae-hayee, M., Vessakosol, P., and Nuntadusit, C., (2014),
“Heat Transfer Enhancement of Impinging Row Jets in Cross-flow with Mounting Baffles
on Surface”, Advanced Materials Research, Vol. 931-932, pp. 1218-1222, (The 5th KKU
International Engineering Conference 2014 (KKU-IENC 2014), March 27-29, Khon Kaen,
Thailand)

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

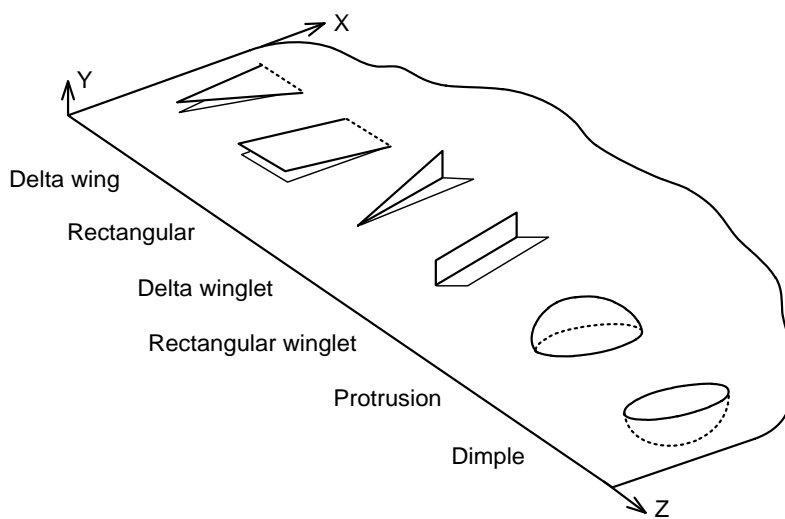
ปัจจุบันพลังงานจากฟอสซิล ถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ นับวันหายากและมีราคาแพงเพราะเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถผลิตทดแทนได้ ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามพลังงานมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อปัจจัยพื้นฐานการดำรงชีวิตของมนุษย์และการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ มนุษย์จึงพยายามคิดค้นหาทางออกโดยการใช้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานความร้อนใต้พิภพ การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน กระบวนการส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน (Convection heat transfer)



รูปที่ 1 การติดแผ่นครีป (Fins) ที่มีกลุ่มของปีกรอบท่อแลกเปลี่ยนความร้อน [1]

การเพิ่มอัตราการพาความร้อนทำได้โดยการเพิ่มพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น ติดครีป (Fins) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน แต่วิธีการนี้ทำให้สิ้นเปลืองวัสดุและทำให้เกิดการสูญเสียความดันในระบบ เนื่องจากครีปจะขวางการไหลทำให้ต้องเพิ่มความดันในระบบหรือเพิ่มกำลังของปั๊มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1 การเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นอีกวิธีที่ช่วยเพิ่มอัตราการพาความร้อนบนพื้นผิว สามารถทำได้โดยการลดความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary layer) หรือทำลายชั้นขอบเขตการไหลที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากชั้นขอบเขตการไหลมีการควบคุมเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ถ้าชั้นขอบเขตการไหลมีความหนามากเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศตั้งฉากกับความหนาจะมีค่าน้อยทำให้มีลักษณะของความเป็นฉนวนทางความร้อนที่มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นขอบเขตที่มีความหนาน้อย การเพิ่มความเร็วให้กับของไหลสามารถช่วยลดความหนาของชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้น

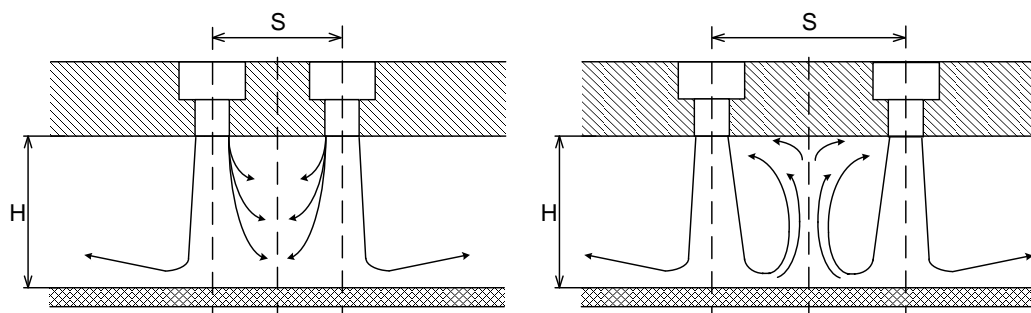
แต่วิธีการนี้จำเป็นต้องเพิ่มกำลังของปั๊มในระบบมากขึ้น การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน โดยการปรับแต่งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น พื้นผิวเป็นหลุม (Dimples) พื้นผิวมีปุ่มยื่น (Protrusions) หรืออาจติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulators) เช่น ตีดริบส์ (Rib) ตีดพินส์ (Pin) และตีดปีกสร้างกระแสหมุนวน (Vortex generator wings) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลในบริเวณใกล้กับพื้นผิว เนื่องจากปีกสร้างกระแสหมุนวนจะรบกวนและทำลายชั้นขอบเขตการไหลบริเวณใกล้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2 การปรับแต่งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน [2]

การใช้เจ็ทพุ่งชน (Jet impingement) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในผนังห้องเผาไหม้และใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง และเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น แต่บริเวณรอบๆ การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ [3-6] ทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่จะใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนแทนเจ็ทลำเดียว แต่กรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีความซับซ้อนกว่ากรณีของเจ็ทลำเดียว เนื่องจากก่อนที่ลำเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการผสมระหว่างลำเจ็ทที่อยู่ติดกัน [7] และหลังจากที่ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการชนกันของเจ็ทผนังที่อยู่ติดกันดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้ลำเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวแล้วจะรวมตัวกันเปลี่ยนเป็นการไหลภายในช่องระหว่างแผ่นเจ็ท

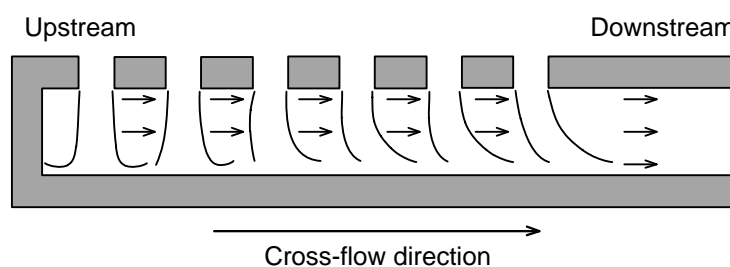
กับพื้นผิวที่ลำเจ็ทพุ่งชน เกิดเป็นกระแสไหลตัดกับลำเจ็ทที่อยู่ใกล้ทางออกของการไหล [8, 9] ดังแสดงในรูปที่ 4 จากการศึกษาพบว่ากระแสไหลตัดจะทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ลำเจ็ทพุ่งชนลดลง เป็นสาเหตุทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ เป็นข้อจำกัดของการใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นผิว



(ก) กรณีระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทน้อย

(ข) กรณีระยะห่างระหว่างท่อเจ็ทมาก

รูปที่ 3 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างลำเจ็ทพุ่งชน [7]



รูปที่ 4 การเกิดกระแสไหลตัดของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน [8]

1.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือ ของไหลที่มีความเร็วพุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนสามารถแบ่งได้ 3 บริเวณ คือ

1.2.1 บริเวณเจ็ทอิสระ

บริเวณเจ็ทอิสระ (Free jet zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีด โดยที่แกนกลางของเจ็ทมีความเร็วสูงสุดและความเร็วของเจ็ทจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวแกนรัศมีของหน้าตัดเจ็ท สามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณโพแทสเซียมเช็ลลอร์ (Potential core zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มออกจากหัวฉีด ความเร็วคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด (ประมาณ 0.99 เท่าของความเร็วที่ปากทางออก) บริเวณการไหลกำลังพัฒนาตัว

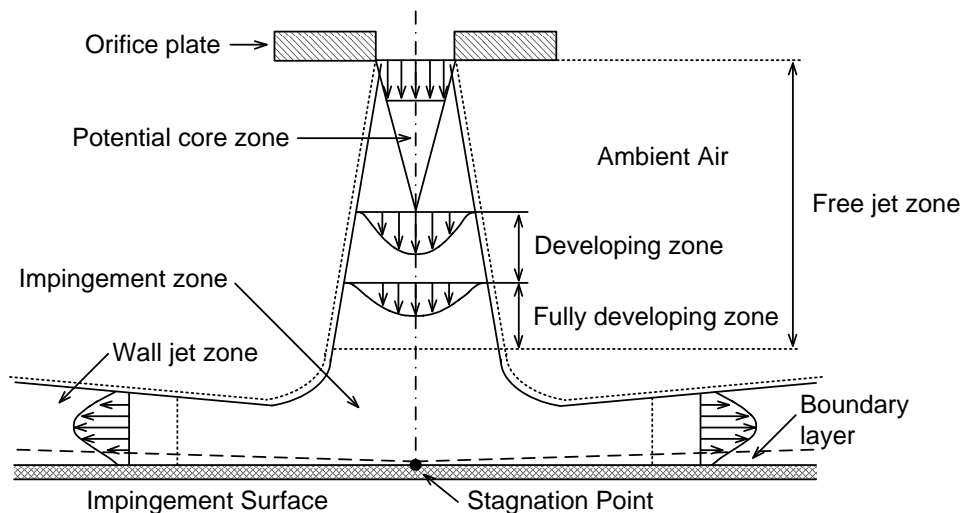
(Developing zone) เป็นบริเวณที่โพเทินเชียลคอร์หมดไปและเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วภายในเจ็ทจะค่อยๆ ลดลงและมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนวแกนรัศมี บริเวณการไหลพัฒนาตัวแล้ว (Fully developed zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์ บริเวณนี้โมเมนตัมของเจ็ทจะยิ่งลดลงเมื่อห่างออกมาจากหัวฉีดมากขึ้น

1.2.2 บริเวณเจ็ทพุ่งชน

บริเวณเจ็ทพุ่งชน (Impingement zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวความเร็วเจ็ทจะเริ่มลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนพื้นผิวรอบจุดหยุดนิ่ง ภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของการไหล เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเจ็ทอย่างกะทันหัน หลังจากการชน

1.2.3 บริเวณเจ็ทผนัง

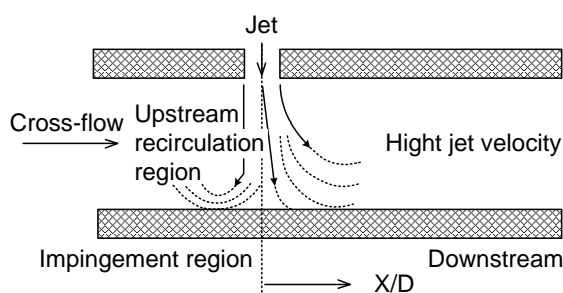
บริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet zone) เป็นบริเวณที่เกิดการไหลบนพื้นผิวรอบบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement zone) บริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลงและชั้นขอบเขตการไหลบนผนังจะค่อยๆ หนาขึ้น



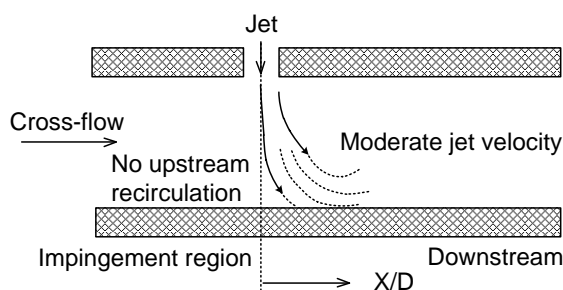
รูปที่ 5 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

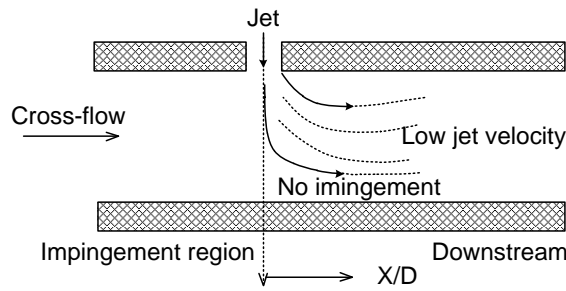
Bouchez และ Goldstein [10] ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัด การทดลองได้ใช้เจ็ทที่มีหน้าตัดวงกลมพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิวที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6D$ เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท พบว่าการไหลของเจ็ทในกระแสไหลตัดสามารถแบ่งลักษณะการไหลออกเป็น 3 กรณี ตามอัตราส่วนความเร็ว (ความเร็วกระแสไหลตัดต่อความเร็วเจ็ท) ได้แก่ อัตราส่วนความเร็วสูง อัตราส่วนความเร็วปานกลาง และอัตราส่วนความเร็วต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับอัตราส่วนความเร็วสูง การพุ่งชนของเจ็ทบนผนังด้านตรงข้ามจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นบริเวณทางด้านต้นทางของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน สำหรับอัตราส่วนความเร็วปานกลาง บริเวณที่เกิดการไหลแบบหมุนวนด้านต้นทางการไหลจะหายไป แต่เจ็ทยังคงพุ่งชนผนังด้านตรงข้าม อัตราส่วนความเร็วต่ำ เจ็ทจะถูกพัดโดยกระแสไหลตัดไม่เกิดการพุ่งชนพื้นผิว



(ก) กรณีอัตราส่วนความเร็วสูง



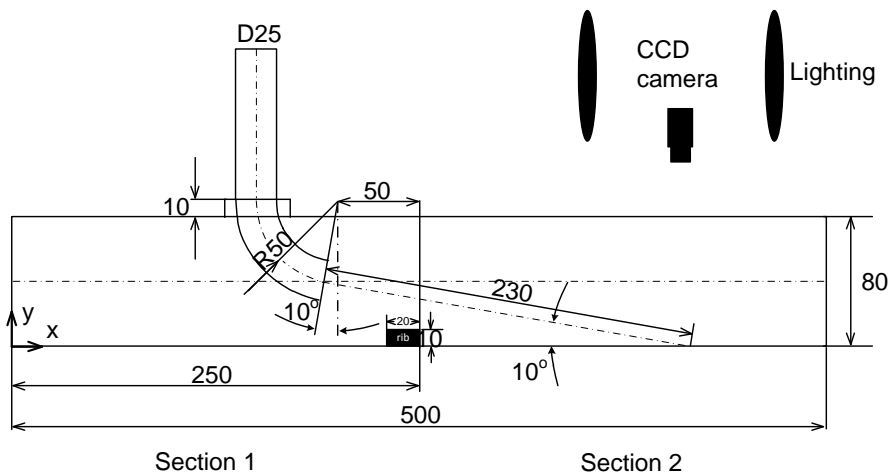
(ข) กรณีอัตราส่วนความเร็วปานกลาง



(ค) กรณีอัตราส่วนความเร็วต่ำ

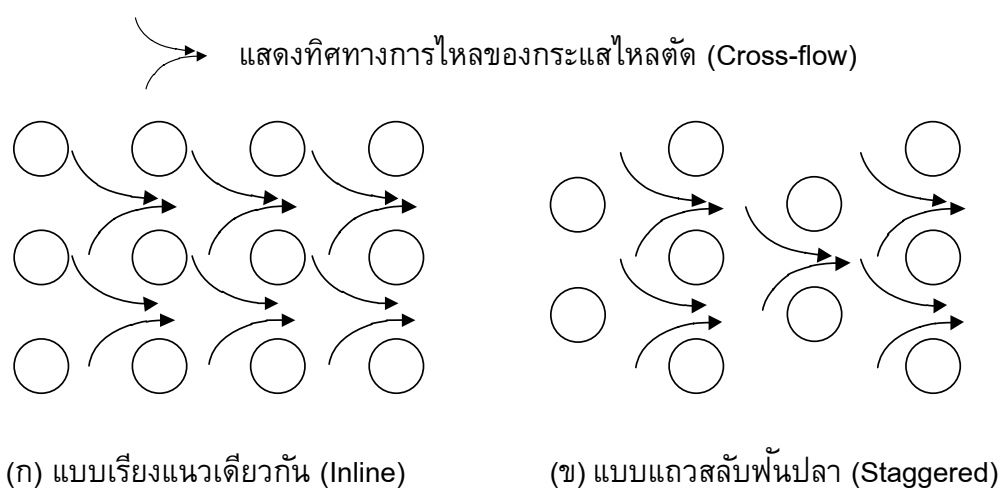
รูปที่ 6 ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัดของ Bouchez และ Goldstein [10]

Wang และคณะ [11] ได้ศึกษาผลของการติดริบส์ (Rib) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อควบคุมการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนในกระแสไหลตัดดังแสดงในรูปที่ 7 เจ็ทจากท่อที่สอดบางส่วนเข้าไปในอุโมงค์ลมไหลพุ่งชนกับพื้นผิวที่มีการติดริบส์ การศึกษาใช้เจ็ทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=22.5$ mm วางทำมุมเอียงกับแกน y 10° และแนวการพุ่งของเจ็ททำเอียงมุม 10° กับพื้นระนาบ ริบส์มีขนาดความหนา $t=20$ mm และความสูง $e=10$ mm ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของเจ็ทที่ใช้ในการศึกษา $Re_j=20,000, 28,000$ และ $40,000$ ส่วนค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของกระแสไหลตัดภายในท่อ $Re_c=80,000, 112,000$ และ $160,000$ พบว่าการติดริบส์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้นั้สเชิลต์นัมเบอร์ที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มสูงขึ้นและการกระจายของนั้สเชิลต์นัมเบอร์มีความสม่ำเสมอ



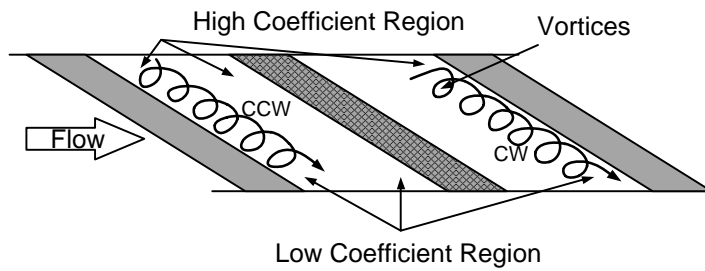
รูปที่ 7 โมเดลและตัวแปรการทดลองของ Wang และคณะ [11]

Wae-hayee และคณะ [12] ได้ศึกษาผลของการจัดเรียงของกลุ่มเจ็ทที่มีต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อน ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D$ และระยะห่างระหว่างเจ็ท $S=3D$ เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ทมีขนาดเท่ากับ 13.2 mm มีการจัดเรียงของเจ็ทสองลักษณะ (1) แบบเรียงแนวเดียวกัน (Inline) (2) แบบเรียงสลับฟันปลา (Staggered) ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าการจัดเรียงแนวเดียวกันให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการจัดเรียงแบบสลับฟันปลา เนื่องจากการจัดเรียงแนวเดียวกันกระแสไหลตัด (Cross-flow) สามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างแถวของลำเจ็ทได้ตลอด ในขณะที่การจัดเรียงแบบสลับฟันปลากระแสไหลตัดถูกกั้นโดยลำเจ็ทที่อยู่ด้านปลายทางการไหล

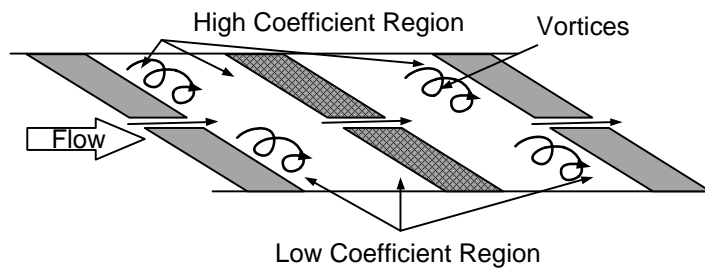


รูปที่ 8 การจัดเรียงกลุ่มเจ็ทพุ่งชนของ Wae-hayee และคณะ [12]

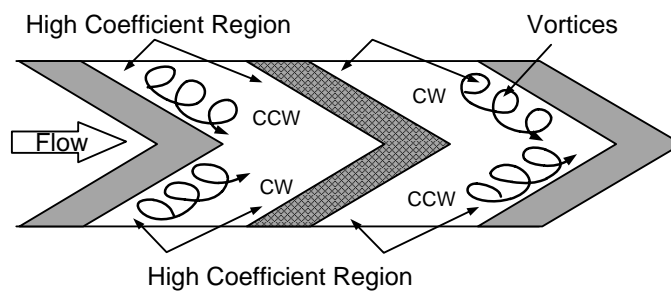
Taslim [13] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตัวขวางการไหล เช่น แบบเอียงทำมุมกับการไหลหลัก (Inclined) แบบเอียงแยกส่วนทำมุมกับการไหลหลัก (broken inclined) และแบบตัววีต่อเนื่อง (V-continuous) ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าการติดตัวขวางการไหลแบบเอียงทำมุมกับการไหลหลักทำให้เกิดการหมุนวน (Vortices) ตามแนวขวางการไหล กระแสหมุนวนจะพาความร้อนบริเวณต้นทางการไหลสู่บริเวณปลายทางการไหลของกระแสหมุนวน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณต้นทางการไหลสูงกว่าบริเวณปลายทางการไหล การติดตัวขวางการไหลแบบเอียงแยกส่วนส่งผลทำให้บริเวณที่เป็นช่องว่างมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการผสมระหว่างกระแสการไหลหลักและกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นในแนวขวางการไหล การติดตัวขวางการไหลแบบตัววีต่อเนื่องจะช่วยสร้างกระแสหมุนวนเกิดขึ้นพร้อมกันสองด้าน ส่งผลให้บริเวณที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเกิดขึ้นสองตำแหน่ง



(ก) ตัวขวางการไหลแบบเอียงทำมุมกับการไหลหลัก



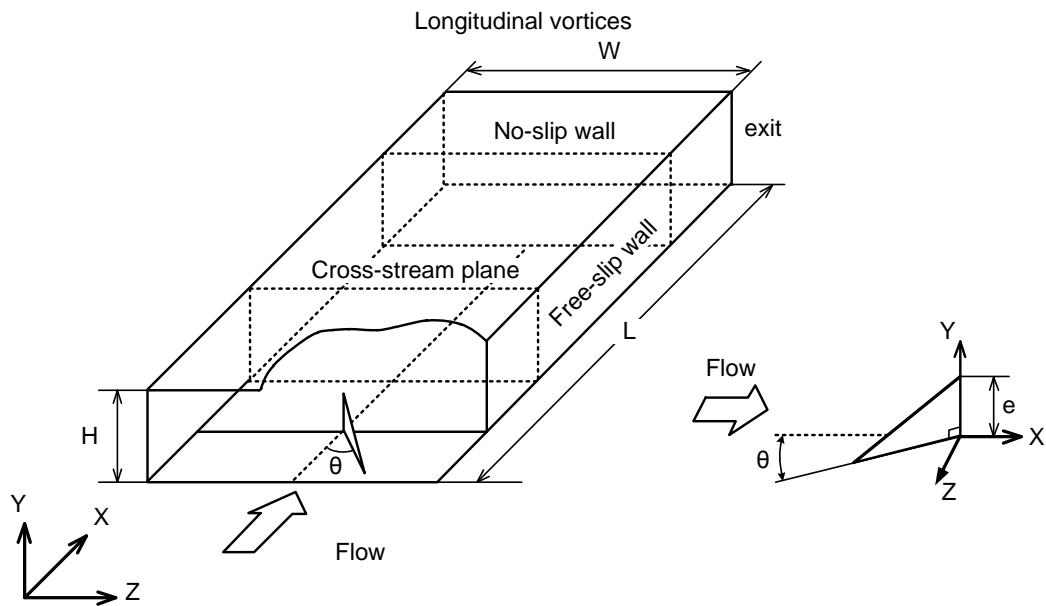
(ข) ตัวขวางการไหลแบบเอียงแยกส่วนทำมุมกับการไหลหลัก



(ค) ตัวขวางการไหลแบบตัววีต่อเนื่อง

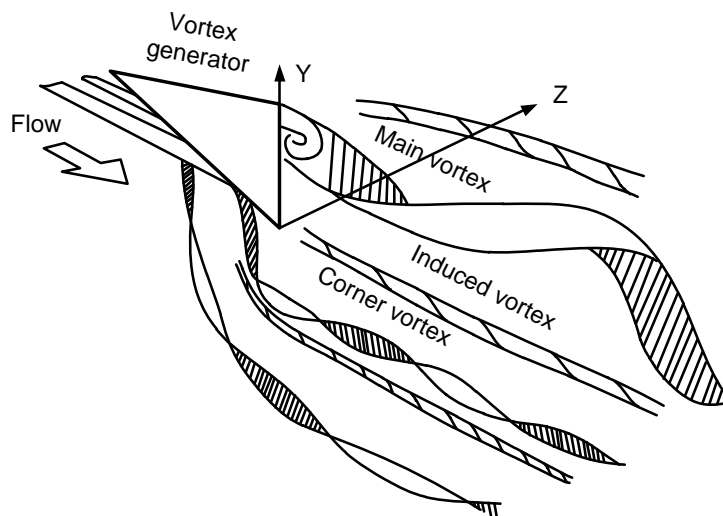
รูปที่ 9 ลักษณะการเกิดกระแสหมุนวนตามแนวขวางการไหลของ Taslim [13]

Biswas และคณะ [14] ได้ศึกษาการติดปีกรูปสามเหลี่ยมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 10 ศึกษาผลของมุมปะทะระหว่างปีกรูปสามเหลี่ยมกับการไหลหลักที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น พบว่าการเพิ่มมุมปะทะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากมุมปะทะที่กว้างมีผลทำให้เกิดกระแสหมุนวนตามแนวยาวที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น อย่างไรก็ตามมุมปะทะที่กว้างขึ้นทำให้เกิดความดันสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น



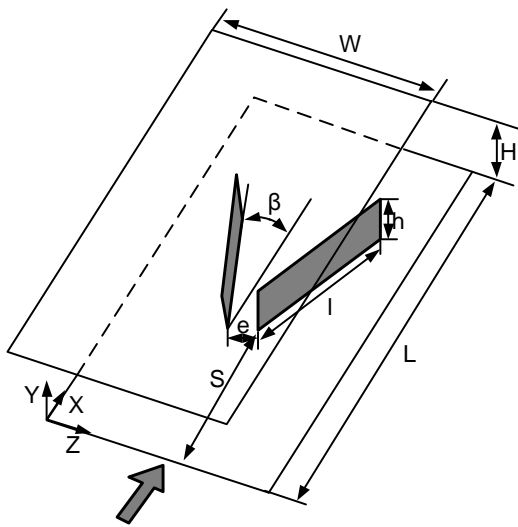
รูปที่ 10 โมเดลและตัวแปรการทดลองของ Biswas และคณะ [14]

รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างการไหลของอากาศผ่านปีกรูปสามเหลี่ยม จากรูปพบว่า การไหลหลัก (Main flow) ถูกแยกตัวออกเมื่อไหลปะทะด้านหน้าของปีกรูปสามเหลี่ยม ส่งผลทำให้กระแสหมุนวนหลัก (Main vortex) เกิดขึ้นด้าน Suction side (+Z) และ Corner vortex เกิดขึ้นด้าน Pressure side (-Z) และในบางกรณีจะเกิด Induced vortex ทั้งด้าน Suction side และ Pressure side จากปรากฏการณ์การไหลแบบหมุนวนตามแนวยาวด้านหลังปีกรูปสามเหลี่ยม ส่งผลทำให้ระดับการไหลแบบปั่นป่วนใกล้พื้นผิวด้านหลังปีกรูปสามเหลี่ยมเพิ่มขึ้น

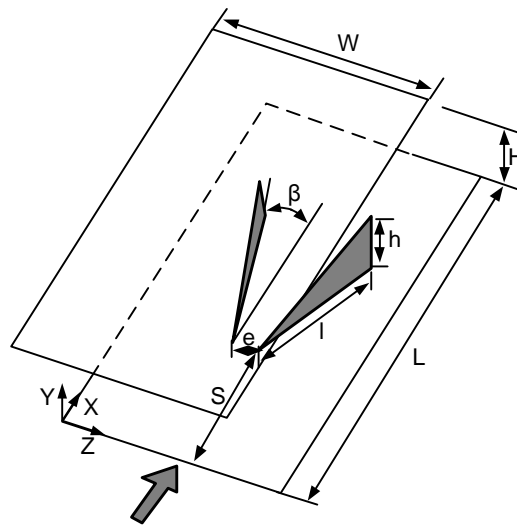


รูปที่ 11 โครงสร้างการไหลของอากาศผ่านปีกรูปสามเหลี่ยมของ Biswas และคณะ [14]

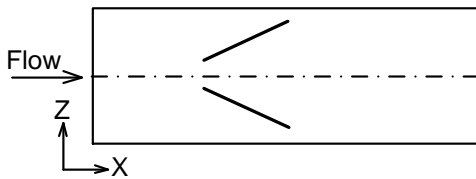
Saha และคณะ [15] ได้ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในกรณีติดตั้งปีกบนพื้นผิวแล็กเปลี่ยนความร้อน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) ปีกรูปสี่เหลี่ยมที่มุมปะทะเอียงเข้าหากัน (2) ปีกรูปสี่เหลี่ยมที่มุมปะทะเอียงออกจากกัน (3) ปีกรูปสามเหลี่ยมที่มุมปะทะเอียงเข้าหากัน และ (4) ปีกรูปสามเหลี่ยมที่มุมปะทะเอียงออกจากกัน พบว่าการติดตั้งปีกเอียงเข้าหากันจะทำให้เกิดการไหลของกระแสหมุนวนหลักหมุนเข้าหากัน และการติดตั้งปีกเอียงออกจากกันจะทำให้เกิดการไหลของกระแสหมุนวนหลักหมุนออกจากกัน จากปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้บริเวณชั้นขอบเขตการไหล (Boundary layer) ของการติดตั้งปีกเอียงเข้าหากันมีความหนาลดลงเมื่อเทียบกับการติดตั้งปีกเอียงออกจากกัน



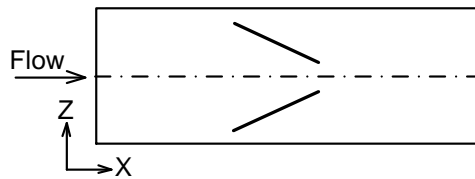
(ก) ลักษณะปีกรูปสี่เหลี่ยม



(ข) ลักษณะปีกรูปสามเหลี่ยม



(ค) ปีกที่มุมปะทะเอียงเข้าหากัน



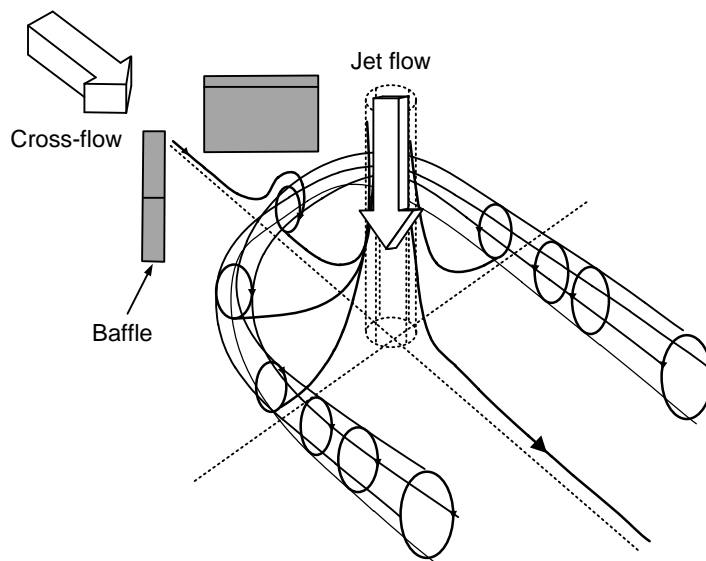
(ง) ปีกที่มุมปะทะเอียงออกจากกัน

รูปที่ 12 โมเดลและตัวแปรการคำนวณของ Saha และคณะ [15]

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวน (Vortex generator wings) ที่มีผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

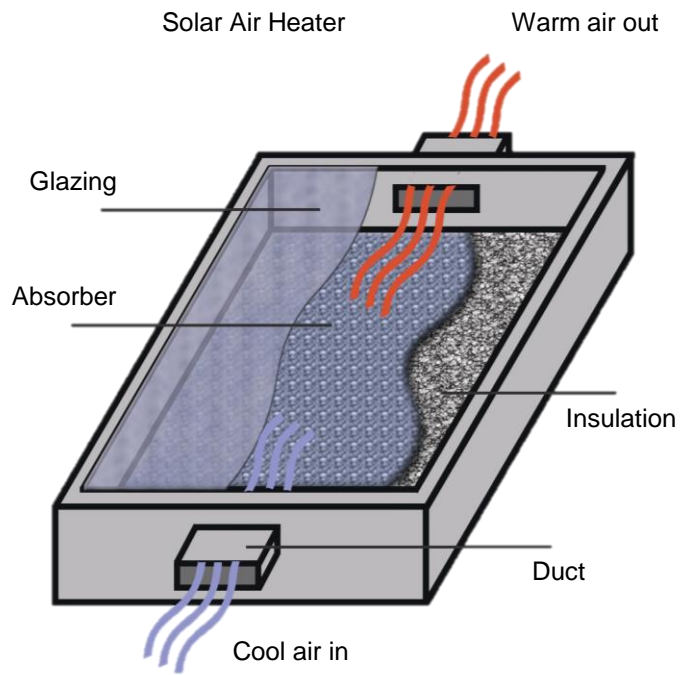


รูปที่ 13 การติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวน (Vortex generator wings) [16]

2.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของการติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทไหลปะทะกรณีเจ็ทแถวและกรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

(2) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบการให้ความร้อน ระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

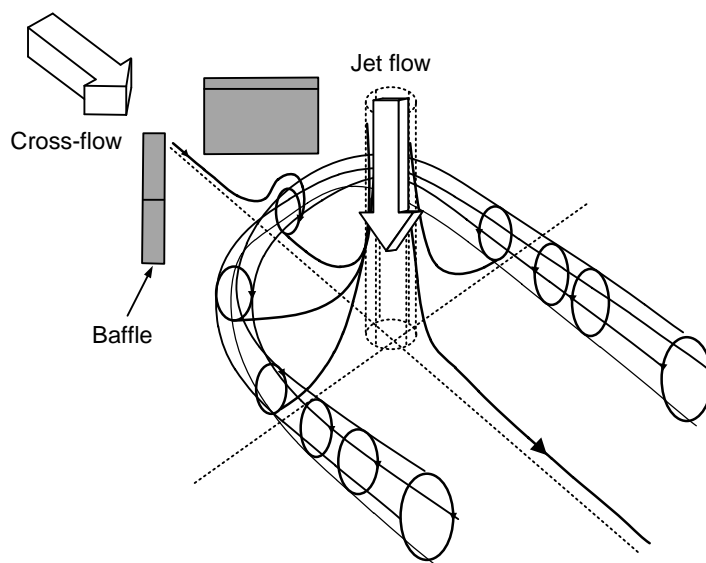


รูปที่ 14 เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ [17]

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวน (Vortex generator wings) ที่มีผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

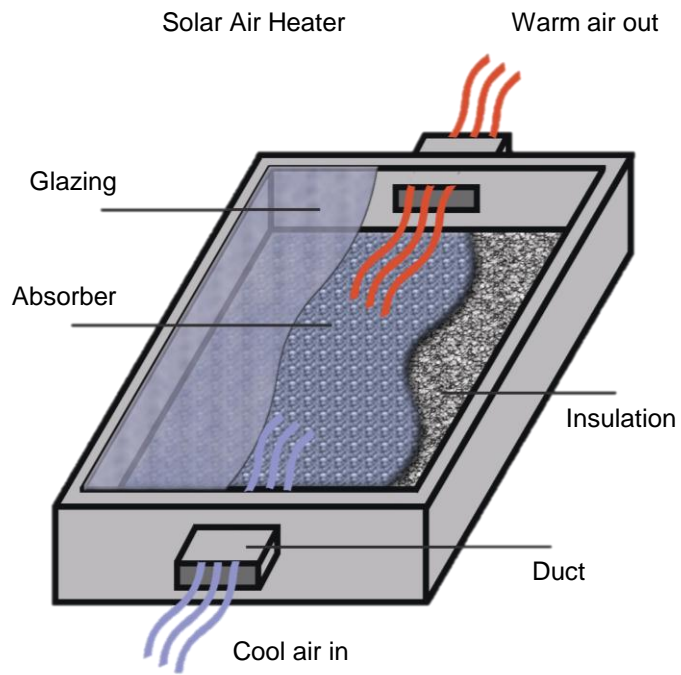


รูปที่ 13 การติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวน (Vortex generator wings) [16]

2.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของการติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทไหลปะทะกรณีเจ็ทแถวและกรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

(2) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบการให้ความร้อน ระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว



รูปที่ 14 เครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ [17]

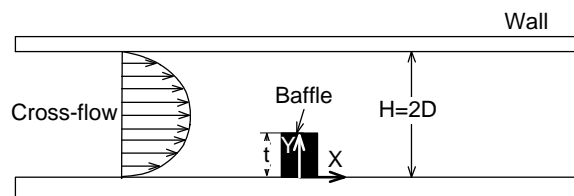
4. ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

4.1 โมเดลและตัวแปรการทดลอง

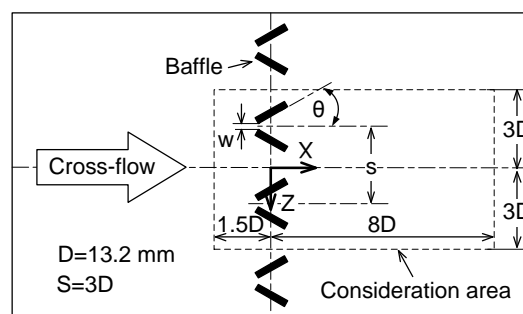
ในหัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับโมเดลการทดลอง วิธีการทดลองและเงื่อนไขการทดลอง ใงานวิจัยได้กำหนดระบบพิกัดที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบระบบพิกัดฉาก (Cartesian coordinate system) และกำหนดให้จุดกำเนิดของระบบพิกัดอยู่บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่แกน X อยู่ในแนวการไหลของกระแสไหลตัด แกน Y อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และแกน Z อยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวการไหลของกระแสไหลตัดดังแสดงในรูปที่ 15

4.1.1 โมเดลและตัวแปรการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 15 แสดงโมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน กระแสไหลตัด (Cross-flow) ถูกปล่อยผ่านอุโมงค์ลมหน้าตัดเหลี่ยมผืนผ้า ไหลปะทะกับปีกสร้างกระแสมุขวนที่ติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุโมงค์ลมและไหลออกจากอุโมงค์ลม ระยะความสูงของอุโมงค์ลมกำหนดให้คงที่ $H=2D$ เมื่อ D มีขนาดเท่ากับ 13.2 mm สำหรับรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1



(ก) มองจากภาพด้านข้างของอุโมงค์ลม



(ข) มองจากภาพด้านบนของอุโมงค์ลม

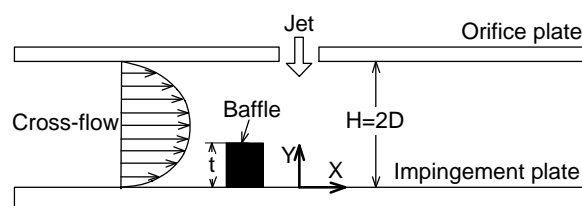
รูปที่ 15 โมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

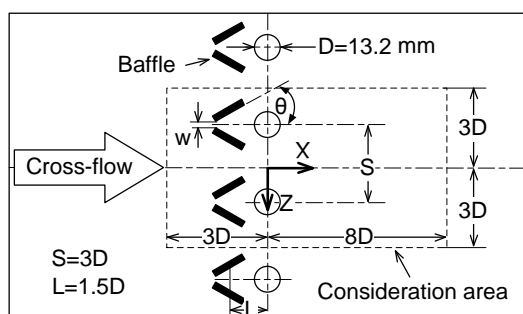
ตัวแปร	เงื่อนไข
ระยะความสูงของโมงค์ลม (H)	2D
ระยะห่างระหว่างปีกสร้างกระแสมุขนวน (s)	3D
ระยะห่างระหว่างปีกสร้างกระแสมุขนวน (w)	0.25D
มุมปะทะของปีกสร้างกระแสมุขนวน (θ)	30° , 45° และ 60°
ความเร็วของกระแสไหลตัด (V_c (m/s))	2.14, 3 และ 5

4.1.2 โมเดลและตัวแปรการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแกว่งชน

รูปที่ 16 แสดงโมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแกว่งชน เจ็ทแกว่งชน 4 ลำ มีการจัดเรียงแบบแถวตรง (Inline) ถูกปล่อยจากออริฟิฟิสฟุ้งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุโมงค์ลมที่มีการจำลองกระแสไหลตัด (Cross-flow) กำหนดให้ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน $H=2D$ เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออริฟิฟิสเท่ากับ 13.2 mm เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทแต่ละรูคองที่ $Re_j=13,400$ อัตราส่วนความเร็ว (ความเร็วเจ็ทต่อความเร็วกระแสไหลตัด) ได้ปรับให้อยู่ที่ $VR=3, 5$ และ 7 สำหรับรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 2



(ก) ภาพมองจากด้านข้างของเจ็ทแกว่งชน



(ข) ภาพมองจากด้านบนของเจ็ทแถวฟุ้งชน

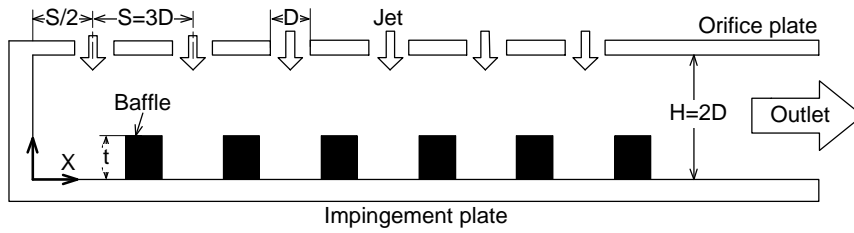
รูปที่ 16 โมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแถวฟุ้งชน

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแถวฟุ้งชน

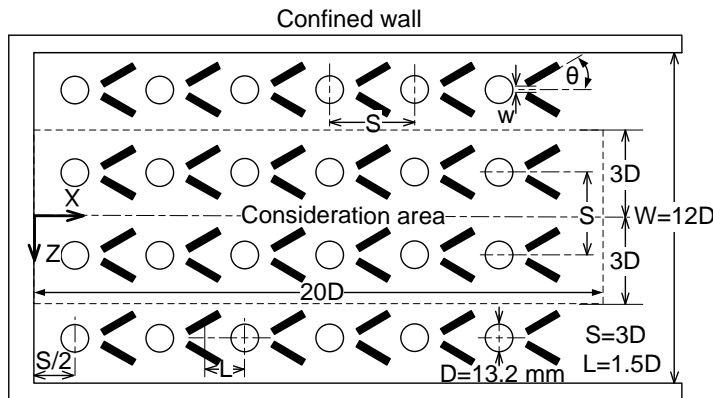
ตัวแปร	เงื่อนไข
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออรัลฟิส (D)	13.2 mm
ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชน (H)	2D
ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท (S)	3D
ระยะห่างจากปีกสร้างกระแสหมุนวนถึงจุดที่เจ็ทฟุ้งชน (L)	1.5D
ระยะห่างระหว่างปีกสร้างกระแสหมุนวน (w)	0.25D
มุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวน (θ)	30° , 45° และ 60°
อัตราส่วนความเร็ว (VR)	3, 5, และ 7
เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ท (Re_j)	13,400

4.1.3 โมเดลและตัวแปรการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทฟุ้งชน

รูปที่ 17 แสดงโมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทฟุ้งชน กลุ่มเจ็ทจำนวน 24 ลำ มีการจัดเรียงแบบแถวตรง (Inline) 4 แถว แถวละ 6 ลำ ถูกปล่อยจากออรัลฟิสฟุ้งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ในด้านตรงข้าม โดยเจ็ทหลังจากที่ฟุ้งชนพื้นผิวจะเกิดการสะสมแล้วไหลรวมกันเป็นกระแสไหลตัด (Cross-flow) และไหลออกจากอุโมงค์ลมทางช่องที่ได้กำหนดไว้ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทฟุ้งชนกำหนดให้คงที่ $H=2D$ เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออรัลฟิสเท่ากับ 13.2 mm สำหรับรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3



(ก) ภาพมองจากด้านข้างของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน



(ข) ภาพมองจากด้านบนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 17 โมเดลการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุมบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

ตารางที่ 3 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุมบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

ตัวแปร	เงื่อนไข
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออรัฟิส (D)	13.2 mm
ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H)	2D
ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท (S)	3D
ระยะห่างจากตัวสร้างกระแสมุมจนถึงจุดที่เจ็ทพุ่งชน (L)	1.5D
ระยะห่างระหว่างผนังจำกัดการไหลถึงท่อเจ็ท (S/2)	1.5D
ระยะห่างระหว่างปีกสร้างกระแสมุม (w)	0.25D
มุมปะทะของปีกสร้างกระแสมุม (θ)	30° , 45° และ 60°
เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ท (Re_j)	5,000, 7,500, 10,000, 13,400, 15,000 และ 20,000

การทดลองจะควบคุมผลต่างอุณหภูมิของเจ็ทและอุณหภูมิภายในห้องทดลองไม่เกิน 2°C สำหรับค่าเรย์โนลด์สของเจ็ท (Reynolds number, Re_j) ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการต่อไปนี้

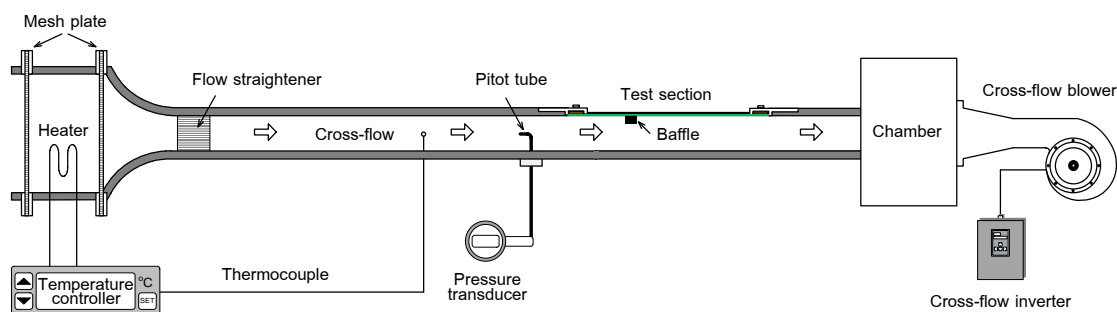
$$Re_j = \frac{DV_j}{\nu} \quad (1)$$

- โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ริฟิส, m
 V_j คือ ความเร็วที่จุดศูนย์กลางปากทางออกเจ็ท, m/s
 ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ, m^2/s

4.2 ชุดทดลอง

3.2.1 ชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

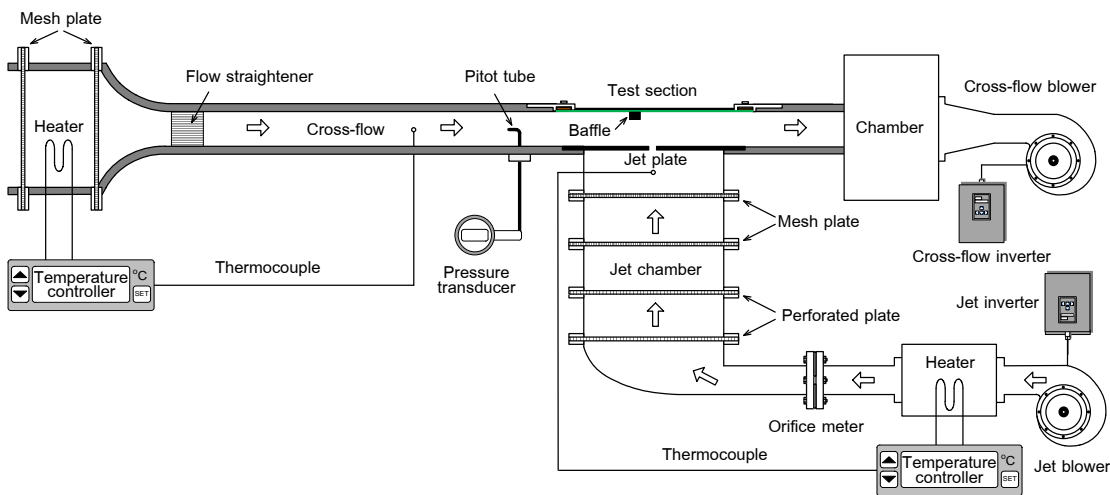
รูปที่ 18 แสดงรายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับการสร้างกระแสไหลตัด (Cross-flow) อากาศในห้องทดลองถูกดูดด้วยโบลเวอร์ขนาด 3 HP มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งฮีตเตอร์ที่มีกำลัง 2 kW ให้ความร้อนกับอากาศโดยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังฮีตเตอร์ผ่านชุดควบคุมอุณหภูมิ อากาศจะไหลผ่านพิทอต์ทิวบ์ (Pitot-static tube) ที่ติดตั้งไว้ด้านหน้าของส่วนทดสอบเพื่อวัดอัตราการไหลของกระแสไหลตัดก่อนเข้าส่วนทดสอบ อุโมงค์ลมมีความสูง 26.4 mm ($H=2D$) ความกว้าง 300 mm และความยาว $2,000 \text{ mm}$ อุณหภูมิของกระแสไหลตัดได้ควบคุมให้อยู่ในช่วง 27.4°C ถึง 27.8°C สำหรับชุดทดลองทั้งหมดได้ติดตั้งเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและทำให้การควบคุมอุณหภูมิเจ็ทคงที่มากขึ้น



รูปที่ 18 รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

4.2.2 ชุดทดลองสำหรับศึกษาขนาดของเจ็ทแฉวพุ่งชนในกระแสไหลตัด

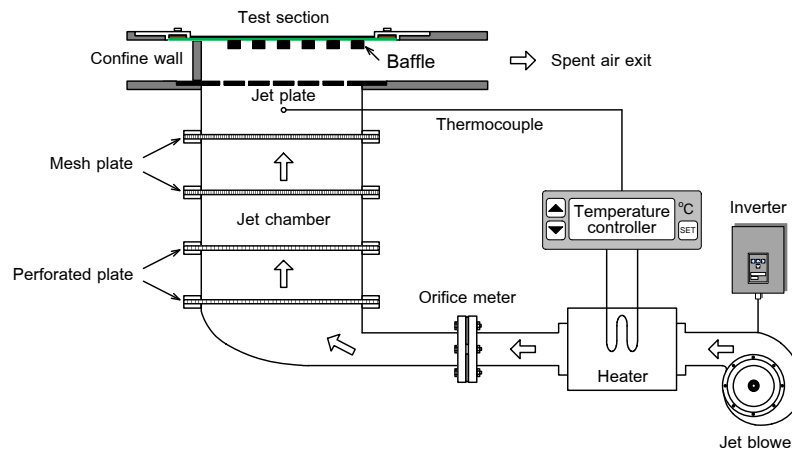
รูปที่ 19 แสดงรายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษาขนาดของเจ็ทแฉวพุ่งชนในกระแสไหลตัด รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษาขนาดของเจ็ทแฉวพุ่งชนในกระแสไหลตัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้สร้างกระแสไหลตัด (Cross-flow) และส่วนที่ใช้สร้างเจ็ท สำหรับส่วนที่ใช้สร้างกระแสไหลตัดได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา สำหรับส่วนที่ใช้สร้างเจ็ทมีการใช้งานร่วมกันระหว่างเจ็ทแฉวและกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว รายละเอียดสำหรับส่วนที่ใช้สร้างเจ็ทจะขอกกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 19 รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษาขนาดของเจ็ทแฉวพุ่งชนในกระแสไหลตัด

4.2.3 ชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

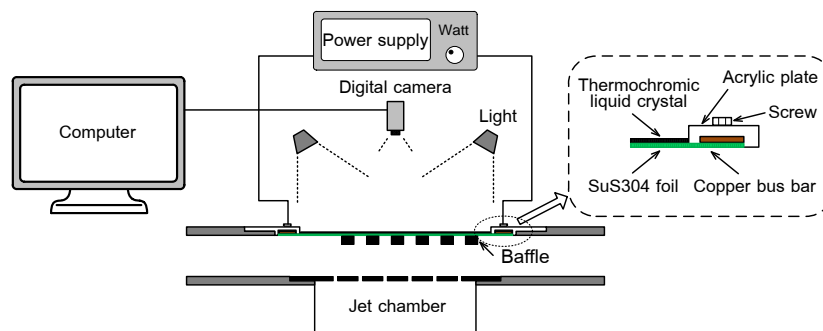
รูปที่ 20 แสดงรายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว อากาศในห้องทดลองถูกดูดผ่านโบลเวอร์ขนาด 3 HP มีการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ อากาศจะไหลผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศ หลังจากนั้นอากาศจะไหลไปยังออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และเข้าไปยังห้องพักอากาศ (Jet chamber) ที่มีหน้าต่างสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 360 mm ความยาว 360 mm และความสูง 850 mm ภายในห้องพักอากาศประกอบด้วยแผ่นเหล็กตะแกรงและตาข่ายมุ้งลวดเพื่อให้ความเร็วที่ไหลออกจากออร์ริฟิสมีความสม่ำเสมอ การควบคุมอุณหภูมิของอากาศได้ใช้ฮีตเตอร์ที่มีกำลัง 2 kW ให้ความร้อนกับอากาศโดยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังฮีตเตอร์ผ่านชุดควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิของเจ็ทได้ควบคุมให้อยู่ในช่วง 27.4°C ถึง 27.8°C สำหรับชุดทดลองทั้งหมดได้ติดตั้งเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและทำให้การควบคุมอุณหภูมิเจ็ทคงที่มากขึ้น



รูปที่ 20 รายละเอียดชุดทดลองสำหรับศึกษากรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

4.3 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

รูปที่ 21 แสดงรายละเอียดส่วนทดสอบสำหรับวัดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว สำหรับแผ่นที่ใช้ในการวัดการถ่ายเทความร้อนทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 10 mm โดยตรงกลางแผ่นอะคริลิกมีการเจาะรูเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 180 mm × 270 mm จากนั้นจึงแผ่นสแตนเลสบาง (Stainless foil) ที่มีความหนา 0.03 mm ให้เรียงตั้งโดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสบางไว้ทั้งสองข้างเพื่อเป็นขั้วสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นสแตนเลส ในการทดลองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสบางจนเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นวัดกระแสไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าเพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลสบาง



รูปที่ 21 รายละเอียดส่วนทดสอบสำหรับการวัดการถ่ายเทความร้อน

สำหรับอัตราการเกิดความร้อน (\dot{q}_{input}) บนแผ่นสเตนเลสบางสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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

ในที่นี้	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส, A
	R	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสเตนเลส, Ω
	A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน, m^2

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \sigma \epsilon_{TLC} (\bar{T}_w^4 - T_s^4) - h_c (\bar{T}_w - T_s)}{T_w - T_j} \quad (3)$$

ในที่นี้	T_j	คือ อุณหภูมิของเจ็ท, $^{\circ}C$
	T_s	คือ อุณหภูมิภายในห้องทดลอง, $^{\circ}C$
	T_w	คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมโครมิกลิตคริสตัล, $^{\circ}C$
	\bar{T}_w	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน, $^{\circ}C$
	σ	คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzman เท่ากับ $5.670373 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
	ϵ_{TLC}	คือ ค่าการแผ่รังสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิตคริสตัลเท่ากับ 0.9 [11]
	h_c	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ, $\text{W/m}^2 \cdot \text{C}^2$ [9]

การกระจายอุณหภูมิตั้งแต่บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนวัดโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิตคริสตัลติดบนแผ่นสเตนเลสบาง (ด้านตรงข้ามกับพื้นผิวที่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน) ใช้กล้องดิจิตอลที่มีการเชื่อมต่อการทำงานกับคอมพิวเตอร์ในการบันทึกภาพบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิตคริสตัล ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิตั้งกับที่ปรากฏก่อนใช้วัดอุณหภูมิตั้งตามหัวข้อ 4.4 จากสมการที่ (3) สามารถคำนวณหาค่าตัวเลขนัมเบอร์ (Nu) ได้จากความสัมพันธ์

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

- เมื่อ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ริฟิส, m
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเจ็ท, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

สำหรับนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหล (Spanwise average Nusselt number, \overline{Nu}_z) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\overline{Nu}_z = \frac{\overline{h}_z D}{k} \quad (5)$$

ในที่นี้ \overline{h}_z คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในแนวขวางการไหล สามารถคำนวณได้จากสมการ (3) โดยการแทนค่าอุณหภูมิเฉพาะจุด (T_w) เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวในแนวขวางการไหล ($\overline{T}_{w,z}$) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\overline{h}_z = \frac{\dot{q}_{input} - \sigma \epsilon_{TLC} (\overline{T}_w^4 - T_s^4) - h_c (\overline{T}_w - T_s)}{\overline{T}_{w,z} - T_j} \quad (6)$$

สำหรับค่าเฉลี่ยของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว (Overall average Nusselt number, $\overline{\overline{Nu}}$) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\overline{\overline{Nu}} = \frac{\overline{\overline{h}} D}{k} \quad (7)$$

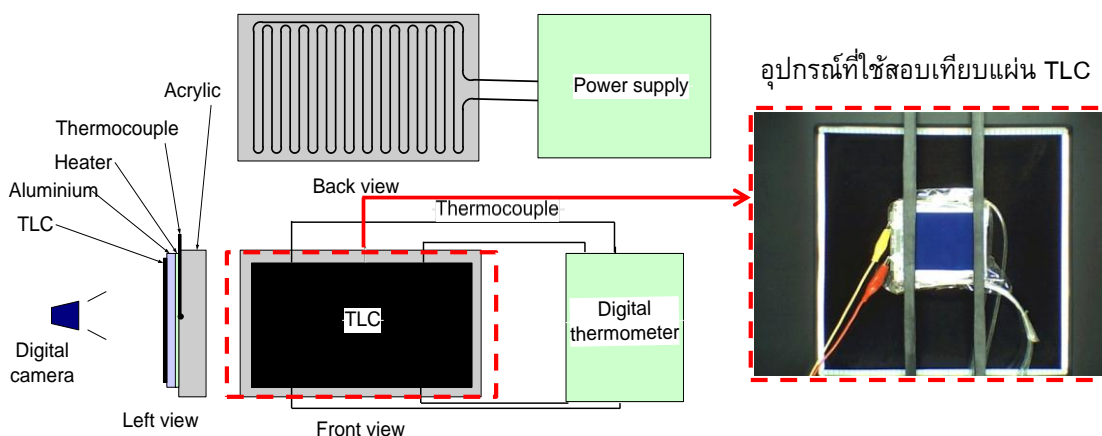
ในที่นี้ $\overline{\overline{h}}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยทั้งพื้นผิว สามารถคำนวณได้จากสมการ (3) โดยการแทนค่าอุณหภูมิเฉพาะจุด (T_w) เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งพื้นผิว ($\overline{\overline{T}}_w$) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\overline{\overline{h}} = \frac{\dot{q}_{input} - \sigma \epsilon_{TLC} (\overline{\overline{T}}_w^4 - T_s^4) - h_c (\overline{\overline{T}}_w - T_s)}{\overline{\overline{T}}_w - T_j} \quad (8)$$

ค่าความไม่แน่นอนของนัสเซิลต์นัมเบอร์อยู่ในช่วง 3.33% ถึง 4.86% ใช้วิธีการคำนวณของ Kline และ McClintock [18] ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิผนังใช้วิธีการคำนวณของ Geers [9] ให้ค่าความไม่แน่นอนสูงกว่าที่ใช้ในงานวิจัยเล็กน้อย

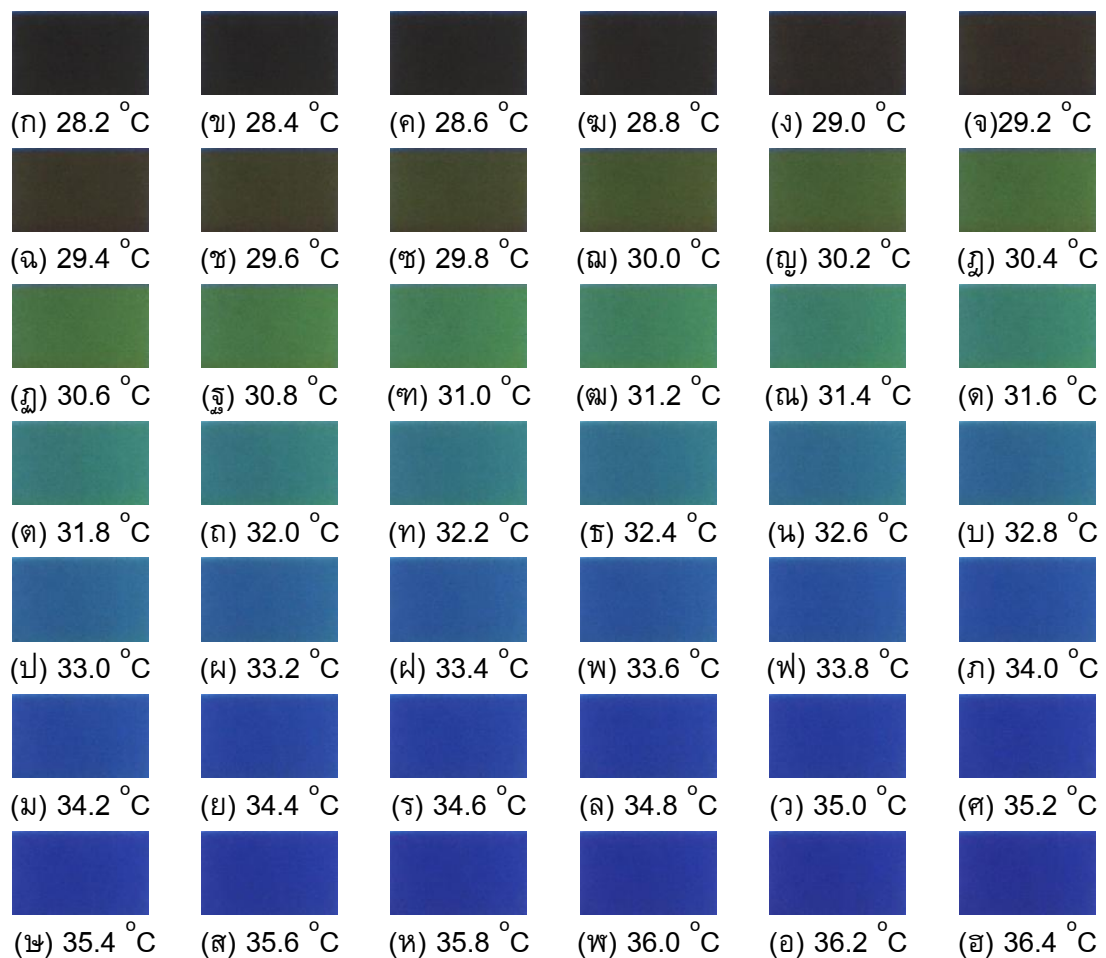
4.4 การสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล

การใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลเพื่อวัดการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน จำเป็นต้องสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลก่อนใช้งาน รูปที่ 22 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล โดยติดตั้งแผ่นฮีตเตอร์บนแผ่นอะคริลิกที่มีขนาดความกว้าง 75 mm ความยาว 105 mm และความหนา 10 mm ขั้วของฮีตเตอร์จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ ส่วนด้านหน้าของฮีตเตอร์จะติดแผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 mm ซึ่งมีหน้าที่รับความร้อนจากฮีตเตอร์และกระจายความร้อนให้ทั่วทั้งแผ่น ด้านหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมจะติดแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่มีขนาดความกว้าง 47 mm ความยาว 70 mm เพื่อใช้ในการแสดงสีที่อุณหภูมิต่างๆ บริเวณด้านหน้าของชุดทดลองจะติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อทำการบันทึกภาพการแสดงสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล สำหรับแผ่นอะลูมิเนียมได้เจาะรูสำหรับติดสายเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 4 จุดเพื่อวัดอุณหภูมิแต่ละจุดมาเฉลี่ยค่าอุณหภูมิเพื่อให้เกิดเป็นการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงที่บันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีนั้นได้กำหนดเงื่อนไขให้เหมือนกับสภาวะในการทดลองจริง ได้แก่ การให้แสงสว่างบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล และระยะห่างของกล้องบันทึกภาพ ในการสอบเทียบสีแต่ละครั้งจะกำหนดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 28°C ถึง 40°C ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี (สีดำ) จนถึงแสดงสีน้ำเงินเข้ม



รูปที่ 22 ชุดทดลองที่ใช้ในการสอบเทียบสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัล

สำหรับขั้นตอนการสอบเทียบสีได้จัดอุปกรณ์ให้อยู่ในสภาพเดียวกับการทดลอง จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์จนกระทั่งอุณหภูมิบนแผ่นอะลูมิเนียมเท่ากับ 40°C ซึ่งแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลจะแสดงสีน้ำเงินเข้ม รอให้อุณหภูมิบนแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าคงที่จึงทำการบันทึกภาพแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลดังแสดงในรูปที่ 23(ฮ) และทำซ้ำลักษณะเดียวกันโดยลดอุณหภูมิบนแผ่นอะลูมิเนียมลงครั้งละ 0.2°C จนถึงอุณหภูมิที่แผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลไม่แสดงสี (สีดำ) ดังแสดงในรูปที่ 23(ก)



รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 23 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบสีแต่ละภาพนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสีและอุณหภูมิโดยโปรแกรมที่พัฒนาในซอฟต์แวร์ MATLAB เมื่อนำภาพทั้งหมดที่ได้จากการสอบเทียบสีแต่ละภาพมาแยกให้อยู่ในระบบสี RGB จากนั้นวิเคราะห์ให้อยู่ในระบบสี HIS ตามสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{cases} \frac{1}{360} \left[90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right) \right] & \text{For } G > B \\ \frac{1}{360} \left[90 - \arctan\left(\frac{F}{\sqrt{3}}\right) + 180 \right] & \text{For } G < B \end{cases} \quad (9)$$

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

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

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (10)$$

$$S = 1 - \left[\frac{\min(R, G, B)}{I} \right] \quad (11)$$

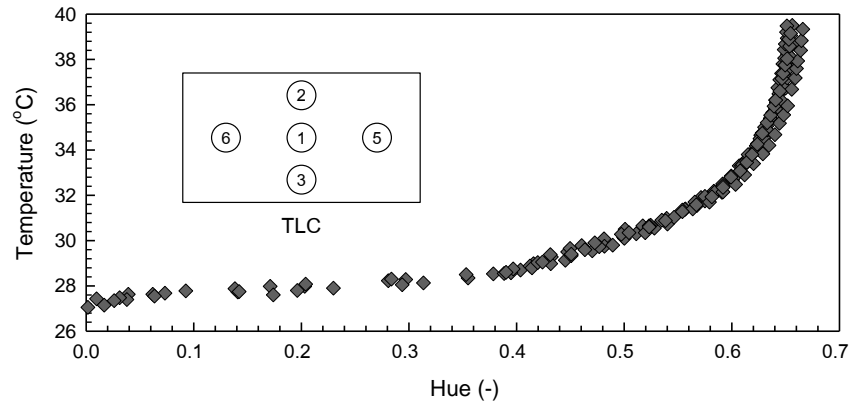
ในที่นี้	R	คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีแดงของจุดภาพ
	G	คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีเขียวของจุดภาพ
	B	คือ ความเข้มขององค์ประกอบสีน้ำเงินของจุดภาพ
	H	คือ แสดงค่าเฉดสีของจุดภาพ
	S	คือ แสดงค่าการอิ่มตัวของจุดภาพ
	I	คือ แสดงค่าความมืดความสว่างสีของจุดภาพ

จากสมการที่ (9), (10) และ (11) ค่าความเข้มขององค์ประกอบสี RGB ในแต่ละภาพสามารถแปลงเป็นข้อมูลสี HSI โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 24 ในรูปแสดงผลการสอบเทียบ 5 ตำแหน่งบนแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่ใช้ทดลองจริง เนื่องจากแผ่นนี้มีขนาดใหญ่จึงแบ่งบริเวณที่ทำการสอบเทียบ 5 บริเวณ คือ บริเวณตรงกลางของพื้นผิว บริเวณด้านซ้าย-ขวาของพื้นผิว และบริเวณด้านบน-ล่างของพื้นผิว ผลการสอบเทียบของทั้ง 5 บริเวณ เส้นกราฟซ้อนทับกันดีและค่าเฉดสี Hue มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจึงสามารถใช้ข้อมูลทั้ง 5 บริเวณมาสร้างเส้นสมการสำหรับทำนายอุณหภูมิ สมการสำหรับทำนายอุณหภูมิแบ่งเป็นสองช่วงเพื่อความละเอียดในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 25 และสมการสำหรับทำนายอุณหภูมิสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

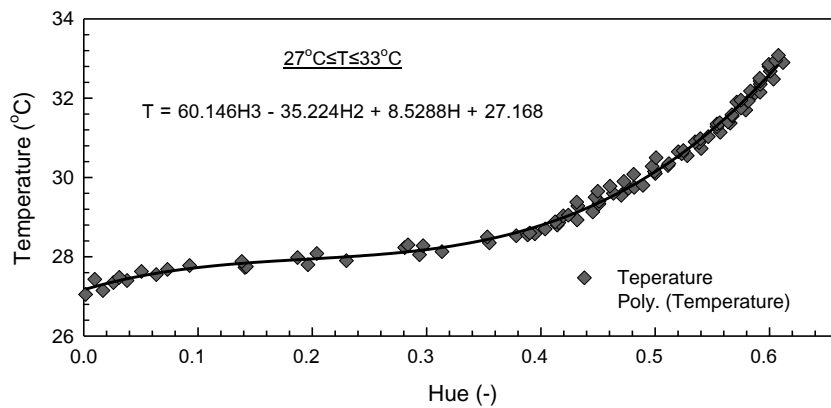
$$T = 60.146H^3 - 35.224H^2 + 8.5288H + 27.16 \quad 27^\circ\text{C} \leq T \leq 33^\circ\text{C} \quad (0.00 \leq H \leq 0.58) \quad (12)$$

$$T = 91158H^4 - 209333H^3 + 180380H^2 - 69093H + 9953.9 \quad 33^\circ\text{C} \leq T \leq 39^\circ\text{C} \quad (0.58 \leq H \leq 0.65) \quad (13)$$

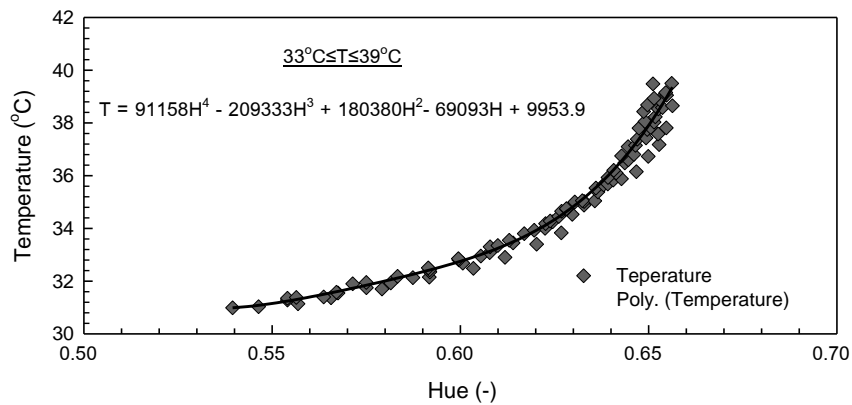
รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตัวประกอบเฉดสี Hue ที่สร้างขึ้นเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบทั้ง 5 บริเวณ พบว่าเส้นสมการสามารถใช้ทำนายอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีอยู่ในช่วง 28°C ถึง 40°C



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตัวประกอบเฉดสี Hue



(ก) 27°C ≤ T ≤ 33°C



(ข) 33°C ≤ T ≤ 39°C

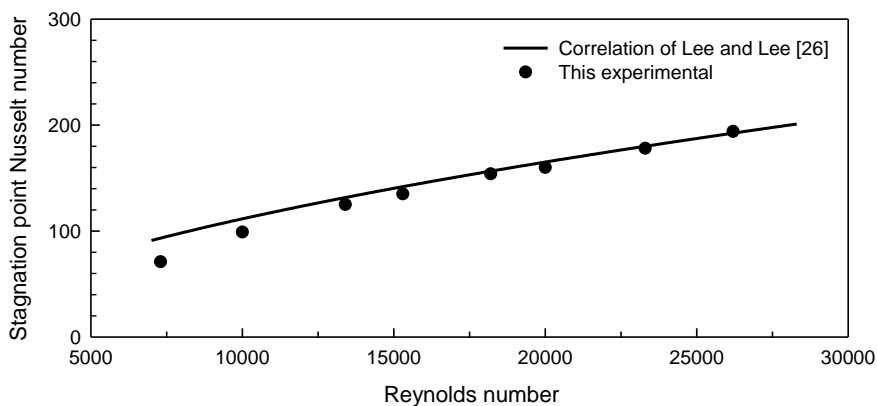
รูปที่ 25 กราฟสมการที่ใช้ทำนายอุณหภูมิเทียบกับจุดข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบ

4.5 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ

การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถทำได้โดยการนำภาพถ่ายที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลมาวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรมที่เขียนในซอฟต์แวร์ MATLAB เลือกภาพถ่ายการแสดงผลของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่เงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนคงที่ค่าหนึ่ง โดยภายในภาพต้องแสดงสีในช่วงอุณหภูมิ 28°C ถึง 40°C โหลดไฟล์ภาพถ่ายของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิควิดคริสตัลที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรม MATLAB ตัดภาพถ่ายให้เหลือเหลือเฉพาะบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ นำภาพถ่ายมาทำการแยกองค์ประกอบของระบบสี RGB แล้วทำการแปลงข้อมูลสีเป็นระบบสี HIS แทนค่าเฉดสี Hue ของแต่ละจุดภาพเพื่อหาข้อมูลการกระจายอุณหภูมิของแต่ละจุดภาพโดยใช้สมการที่ (12) และ (13) ใช้ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวดำหนดหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยใช้สมการที่ (3) และคำนวณหาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่กระจายทั้งพื้นผิว ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (4)

4.6 การตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

การตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ใช้ในการทดลอง ตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบนัสเซิลต์นัมที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกับงานวิจัยที่คาร์เยโนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 26 จากผลการตรวจสอบพบว่านัสเซิลต์นัมเบอร์ที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และ Lee [19]



รูปที่ 26 การเปรียบเทียบนัสเซิลต์นัมที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน [19]

5. การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) คือ การใช้คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหล ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมอย่างกว้างขวางสำหรับนักออกแบบ วิศวกร และนักวิจัยที่จำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ของการไหล เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถช่วยลดระยะเวลาและงบประมาณเมื่อเทียบกับการศึกษาด้วยวิธีการทดลอง งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อศึกษาลักษณะการไหลและอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

5.1 สมการควบคุมการไหล

พฤติกรรมการไหลของของไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลัก 3 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) และสมการพลังงาน (Energy Equation) แสดงดังต่อไปนี้

สมการกฎทรงมวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (15)$$

สมการพลังงาน (Energy Equation)

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u_i T} \right] \quad (16)$$

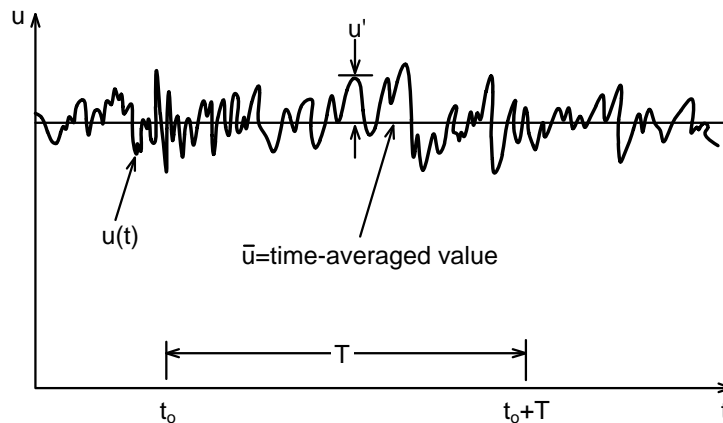
โดยที่ c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, kJ/kg·K

U_i, U_j คือ ส่วนประกอบของความเร็วเฉลี่ย, m/s

T คือ อุณหภูมิของของไหล, °C

5.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีความเร็วไม่สม่ำเสมอและมีทิศทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน การไหลแบบปั่นป่วนความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ณ จุดหนึ่งในสนามการไหลดังแสดงในรูปที่ 27 งานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิด Shear stress transport $k - \omega$ model (SST $k - \omega$ model) ซึ่งเป็นโมเดลที่มีการรวมเอาข้อดีของแบบจำลอง 2 ชนิด ผสมเข้าด้วยกันคือแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard $k - \epsilon$ model สำหรับการคำนวณการไหลบริเวณชั้นไกลผนัง (outer layer) และแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k - \omega$ model สำหรับการคำนวณการไหลบริเวณชั้นชิดผนัง (inner layer) การสลับเปลี่ยนระหว่างแบบจำลองทั้ง 2 สามารถใช้ Blending function ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของแบบจำลอง นอกจากนี้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด SST $k - \omega$ model ได้ทำการปรับปรุงค่า Eddy viscosity โดยการบังคับค่าความเค้นเฉื่อยแบบปั่นป่วน (Turbulent shear stress) ให้มีขอบเขตการปรับปรุงนี้ทำให้การทำนายการไหลที่มี adverse pressure gradient, airfoils และ transonic shock-waves ได้ดีขึ้น [20]



รูปที่ 27 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน ณ จุดหนึ่งในสนามการไหล

สมการของพลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (17)$$

สมการของอัตราการสลายตัวเฉพาะ (Specific dissipation rate, ω)

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (18)$$

สมการของ Blending function, F_1

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (19)$$

เมื่อ

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (20)$$

สมการของความหนืดแบบปั่นป่วน (Turbulent viscosity)

$$\mu_t = \min \left(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{SF_2} \right); \quad a_1 = 0.31 \quad (21)$$

สมการของ Blending function, F_2

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \quad (22)$$

สำหรับ Blending function, F_1 มีค่าเท่ากับ 1 ที่ผิวและมีค่าเข้าสู่ 0 ที่ขอบของชั้นชดผิว (Free stream) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองดั้งเดิมกำหนดเป็นดังนี้

1. สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านในชั้นชดผิว (Inner layer)

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

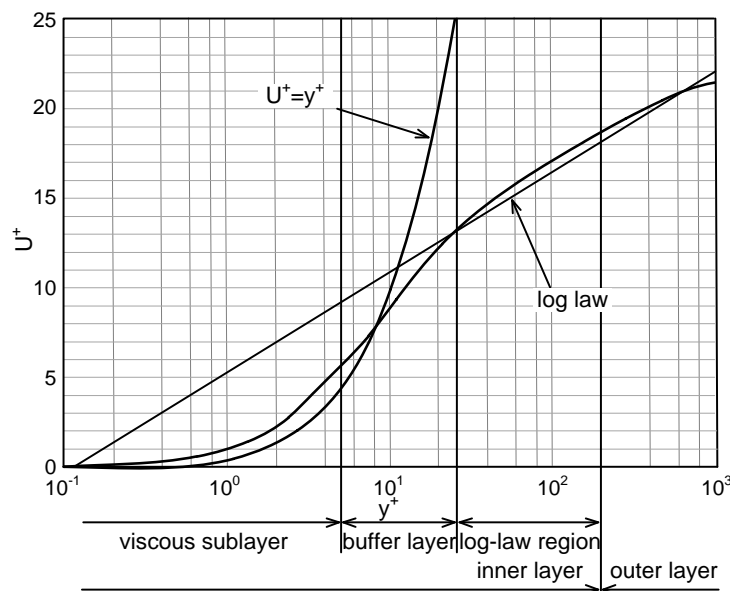
2. สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านนอกชั้นชดผิว (Outer layer)

$$\sigma_k = 1, \sigma_{\omega 2} = 1.168, \alpha = 0.4403, \beta = 0.0828 \text{ และ } \beta^* = 0.09$$

โดยที่	τ_{ij}	คือ ความเค้นบนผนัง (Wall shear stress), N/m^2
	σ_k	คือ ความปั่นป่วนของแผ่นที่นิ้มเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน
	σ_ω	คือ ความปั่นป่วนของแผ่นที่นิ้มเบอร์สำหรับอัตราการสลายเฉพาะ
	ν_t	คือ ความหนืดไหลวนคิเนมาติก (Kinematic eddy viscosity), m^2/s
	$CD_{k\omega}$	คือ การแพร่ในแนวตั้งฉาก (Cross-diffusion)

5.3 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง

การไหลบริเวณชั้นขีดผนังของของไหลประกอบด้วยบริเวณหลัก 2 บริเวณ คือ บริเวณชั้นใน (Inner layer) อยู่ในช่วงประมาณ 10-20% ของความหนาชั้นขีดผนัง ค่าของความเค้นเฉือนเกือบจะคงที่ และค่าความเค้นเฉือนที่ผนังของชั้นนี้จะมีชั้นย่อยๆ 3 ชั้นคือ Linear sub-layer ซึ่งความหนืดมีอิทธิพลต่อการไหลมาก ชั้นที่สองคือชั้น Buffer layer ในชั้นนี้ความหนืดและความปั่นป่วนมีอิทธิพลต่อการไหล และชั้นที่สามคือชั้น Log-law ความปั่นป่วนเป็นตัวการหลักที่ส่งผลต่อความเค้นเฉือน สำหรับบริเวณชั้นนอก (Outer layer) หรือ Law of the wake เป็นบริเวณที่การไหลได้รับอิทธิพลของความเฉื่อยของการไหลเป็นหลัก และเป็นอิสระต่อปัจจัยด้านความหนืดของของไหลดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28 การกระจายความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนในบริเวณชั้นขีดผนัง [21]

สมการตัวแปรไร้มิติของระยะห่างชั้นขีดผนัง (Dimensionless wall distance, y^+) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu} \quad (23)$$

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (24)$$

ความเร็วไร้มิติ (Dimensionless velocity, u^+) สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$u^+ = \frac{u}{U_\tau} \quad (25)$$

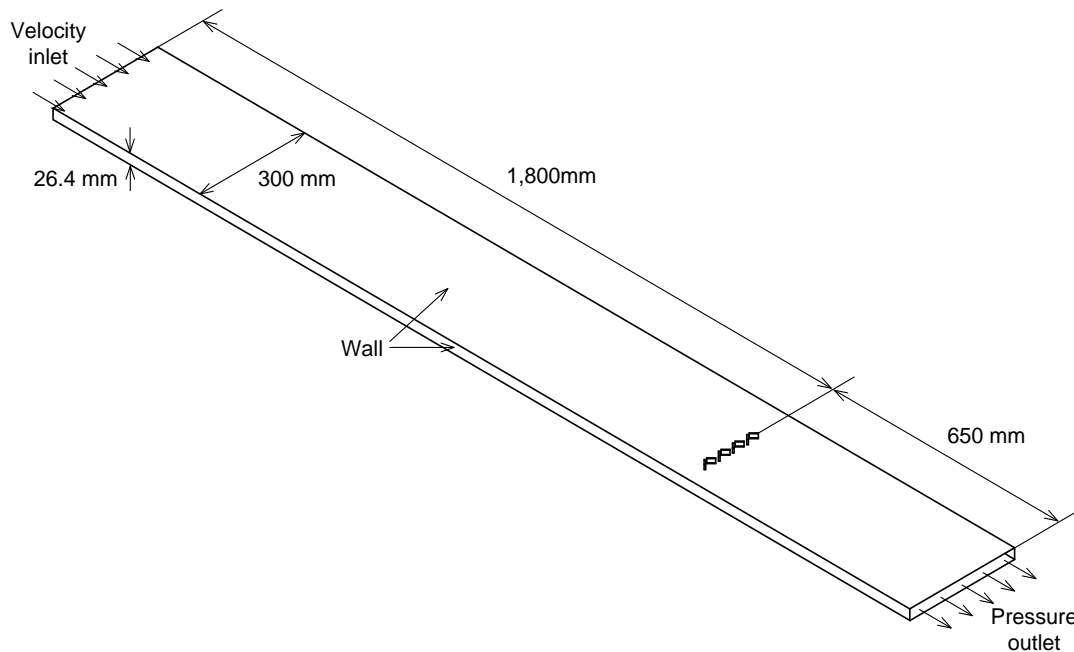
โดยที่	u	คือ ความเร็ว (Velocity), m/s
	U_τ	คือ ความเร็วเฉือน (Shear velocity), m/s
	τ_w	คือ ความเค้นเฉือนบนผนัง (Wall shear stress) , N/m ²
	y	คือ ระยะห่างชั้นขีดผนัง, m

5.4 โมเดลการจำลองการไหล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Version 13.0 (Fluent) ในการจำลองการไหลมีการกำหนดขนาดและเงื่อนไขขอบเขตของโมเดลเหมือนกับการทดลองจริง การจำลองการไหลแบ่งออกเป็น 3 การจำลอง คือ การจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน การจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน และการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

5.4.1 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 29 แสดงโมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ลักษณะโมเดลเป็นอุโมงค์ลมหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความสูง 26.4 mm ($H=2D$) และความกว้าง 300 mm สำหรับทางเข้าและทางออกของกระแสไหลตัดอยู่ที่ตำแหน่งปลายทั้งสองข้างของอุโมงค์ลม และติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวด้านล่างของอุโมงค์ลมในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไหลตัด ระยะจากปากทางเข้าถึงปีกสร้างกระแสหมุนวนและระยะจากปากทางออกถึงปีกสร้างกระแสหมุนวนมีความยาว 1,800 mm และ 650 mm ตามลำดับ



รูปที่ 29 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิว
แลกเปลี่ยนความร้อน

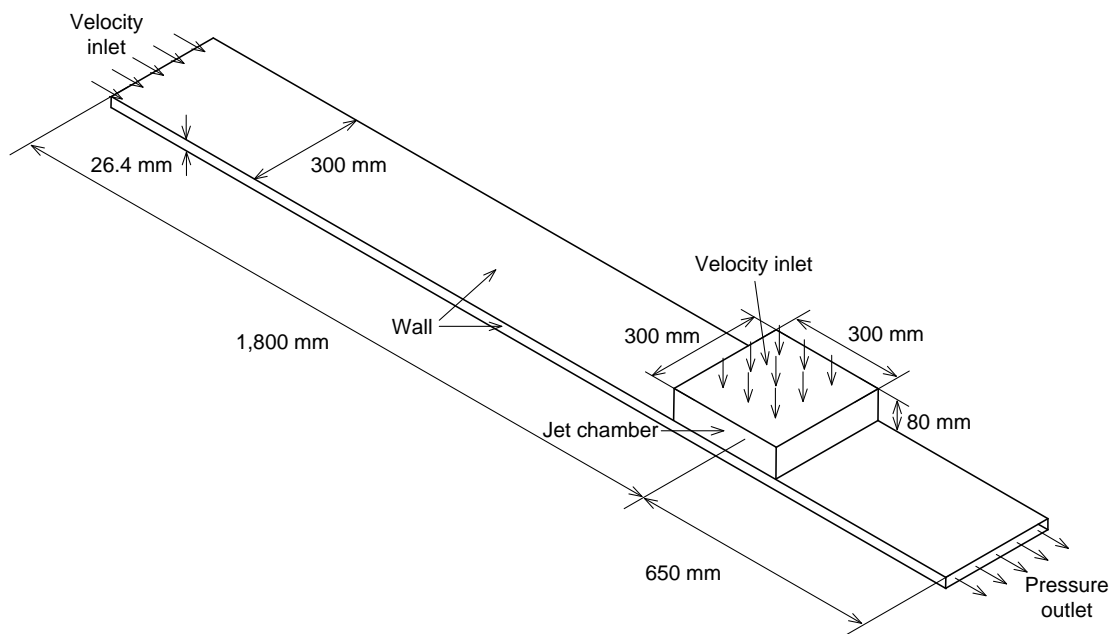
เงื่อนไขขอบเขต (Boundary layer) ที่ใช้ในการจำลองการไหล กำหนดให้ปากทางเข้าอุโมงค์ลมเป็นแบบ Velocity inlet กำหนดความเร็วทางออกของอุโมงค์ลมแบบ Pressure gradient เป็นศูนย์ และให้ผนังไม่มีการไถล (No slip) มีความเร็วเป็นศูนย์ การกำหนดความเร็วจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของอากาศที่ไหลผ่านอุโมงค์ลม สำหรับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของอากาศที่ไหลผ่านอุโมงค์ลมกำหนดให้เท่ากับที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าของกระแสไหลตัด (Inlet boundary condition)

- กรณี $V_c=5$ m/s กำหนดความเร็วกระแสไหลตัดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 4.3 m/s เพื่อให้ได้ความเร็วเท่ากับ 5 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง
- กรณี $V_c=3$ m/s กำหนดความเร็วกระแสไหลตัดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.5 m/s เพื่อให้ได้ความเร็วเท่ากับ 3 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง
- กรณี $V_c=2.14$ m/s กำหนดความเร็วกระแสไหลตัดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1.77 m/s เพื่อให้ได้ความเร็วเท่ากับ 2.14 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง

5.4.2 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแกว่งพุงชน

รูปที่ 30 แสดงโมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแกว่งพุงชน ลักษณะของโมเดลเป็นห้องพักอากาศ (Jet chamber) และอุโมงค์ลมของชุดทดลอง สำหรับห้องพักอากาศกำหนดให้มีความสูง 80 mm ความกว้าง 300 mm และความยาว 300 mm ส่วนของอุโมงค์ลมมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 300 mm ความยาว 2,450 mm และความสูง 26.4 mm โดยห้องพักอากาศและอุโมงค์ลมมีระยะห่าง 2 mm ซึ่งระยะดังกล่าวคือความหนาของแผ่นออรัฟิส สำหรับทางเข้าและทางออกของกระแสไหลตัดอยู่ที่ตำแหน่งปลายทั้งสองข้างของอุโมงค์ลม ทางเข้าของเจ็ทเป็นช่องเปิดด้านบนของห้องพักอากาศ และทางออกของเจ็ทอยู่ที่ตำแหน่งปลายด้านหนึ่งของอุโมงค์ลมซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่กระแสไหลตัดไหลออก ระยะจากทางเข้าถึงแกวเจ็ทและระยะจากแกวเจ็ทถึงทางออกมีความยาว 1,800 mm และ 650 mm ตามลำดับ



รูปที่ 30 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแกว่งพุงชน

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary layer) ที่ใช้ในการจำลองการไหล กำหนดให้ปากทางเข้าอุโมงค์ลมเป็นแบบ Velocity inlet ปากทางเข้าห้องพักอากาศเป็นแบบ Velocity inlet ทางออกของอุโมงค์ลมเป็นแบบ Pressure outlet และผนังให้เป็นแบบ Wall การกำหนดความเร็วจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของอากาศที่ใช้ในการทดลอง สำหรับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของอากาศได้กำหนดให้เท่ากับที่ใช้ในการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางเข้า ขอบเขตทางออก และขอบเขตผนังได้กำหนดดังนี้

เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าของกระแสไหลตัด (Inlet boundary condition)

- กรณี $VR=3$ กำหนดความเร็วกระแสไหลตัดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 5 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง
- กรณี $VR=5$ กำหนดความเร็วกระแสไหลตัดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 3 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง
- กรณี $VR=7$ กำหนดความเร็วกระแสไหลตัดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 2.14 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าของเจ็ท (Inlet boundary condition)

- กรณี $V_j=15$ m/s ($Re_c=13,400$) กำหนดความเร็วที่ทางเข้าห้องพักอากาศให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.0661 m/s เพื่อให้ได้ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ทเท่ากับ 15 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไขขอบเขตทางออก (Outlet boundary condition)

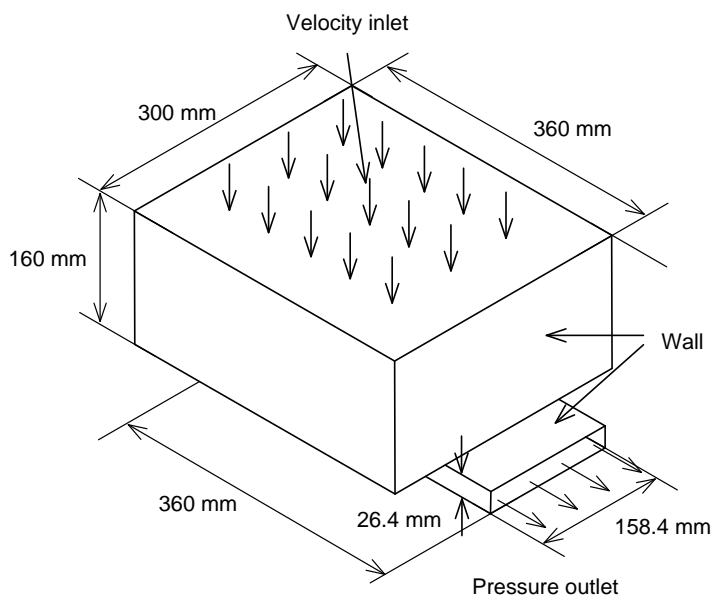
- กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจมีค่าเท่ากับ 0 Pa)

เงื่อนไขขอบเขตผนัง (Wall boundary condition)

- กำหนดให้ผนังไม่มีการไถล (No slip) และมีความเร็วเป็นศูนย์

5.4.3 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 31 แสดงโมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ลักษณะของโมเดลเป็นห้องพักอากาศ (Jet chamber) และอุโมงค์ลมของชุดทดลอง สำหรับห้องพักอากาศกำหนดให้มีความสูง 80 mm ความกว้าง 360 mm และความยาว 360 mm อุโมงค์ลมมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 158.4 mm ความยาว 360 mm และความสูง 26.4 mm โดยห้องพักอากาศและอุโมงค์ลมมีระยะห่าง 2 mm ซึ่งระยะดังกล่าวคือความหนาของแผ่นออรัลฟิส สำหรับทางเข้าของเจ็ทเป็นช่องเปิดด้านบนของห้องพักอากาศ และทางออกของเจ็ทอยู่ที่ตำแหน่งปลายทางการไหลของอุโมงค์ลม



รูปที่ 31 โมเดลการจำลองการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary layer) ที่ใช้ในการจำลองการไหล กำหนดให้ปากทางเข้าห้องพักอากาศเป็นแบบ Velocity inlet ทางออกของอุโมงค์ลมเป็นแบบ Pressure outlet และผนังให้เป็นแบบ Wall การกำหนดความเร็วจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของอากาศที่ใช้ในการทดลอง สำหรับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของอากาศได้กำหนดให้เท่ากับที่ใช้ในการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางเข้า ขอบเขตทางออก และขอบเขตผนังได้กำหนดดังนี้

เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าของเจ็ท (Inlet boundary condition)

- กรณี $V_j=15$ m/s ($Re_c=13,400$) กำหนดความเร็วที่ทางเข้าห้องพักอากาศให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.0661 m/s เพื่อให้ได้ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ทเท่ากับ 15 m/s ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไขขอบเขตทางออก (Outlet boundary condition)

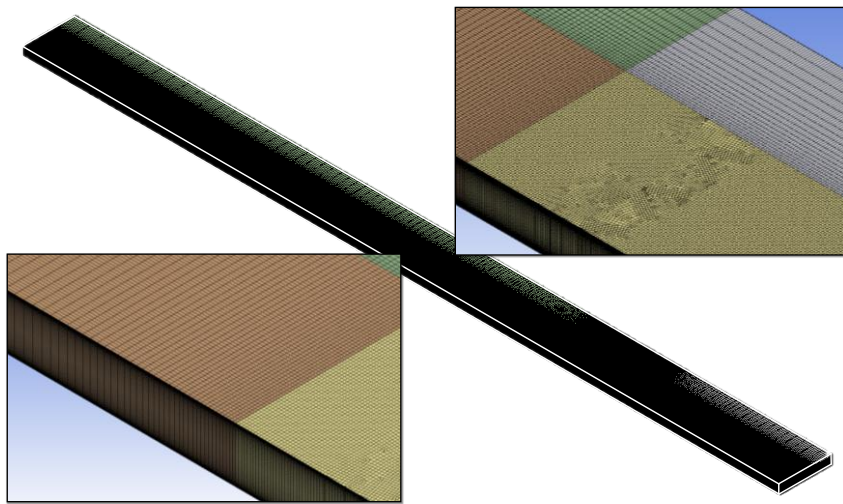
- กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจมีค่าเท่ากับ 0 Pa)

เงื่อนไขขอบเขตผนัง (Wall boundary condition)

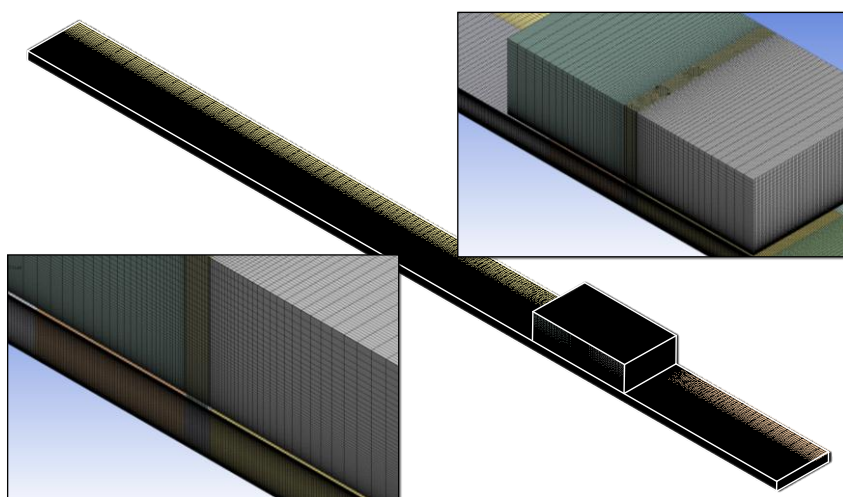
- กำหนดให้ผนังไม่มีการไถล (No slip) และมีความเร็วเป็นศูนย์

5.5 การสร้างกริด

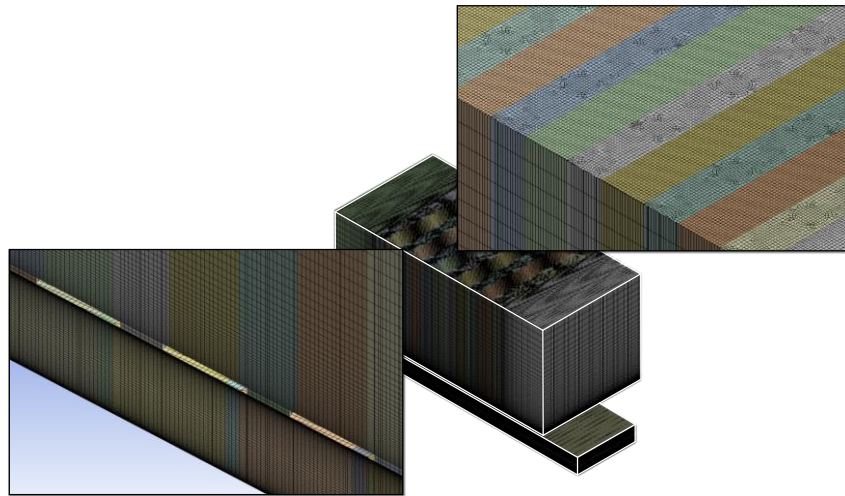
รูปที่ 32, 33 และ 34 แสดงรายละเอียดของการสร้างกริด กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน และกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน ตามลำดับ โดยกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลจะมีลักษณะเป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยม กำหนดให้กริดบริเวณชั้นชิดผนังมีความละเอียดสูง และความละเอียดของกริดจะลดลงเมื่อระยะห่างออกจากบริเวณพื้นผิว



รูปที่ 32 รายละเอียดการสร้างกริดกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

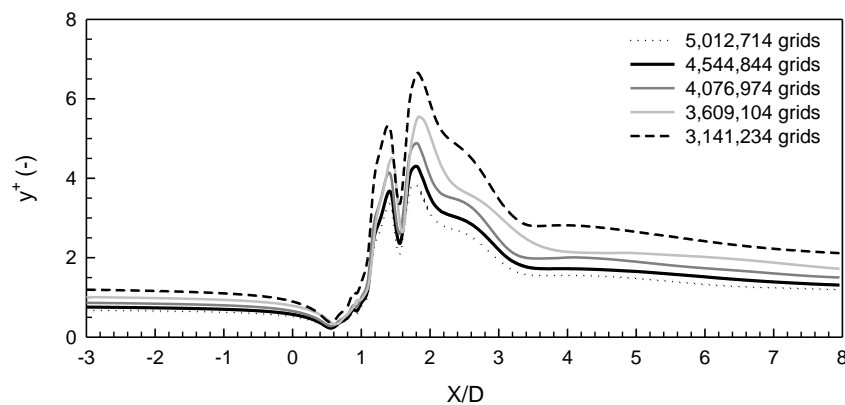


รูปที่ 33 รายละเอียดการสร้างกริดกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน

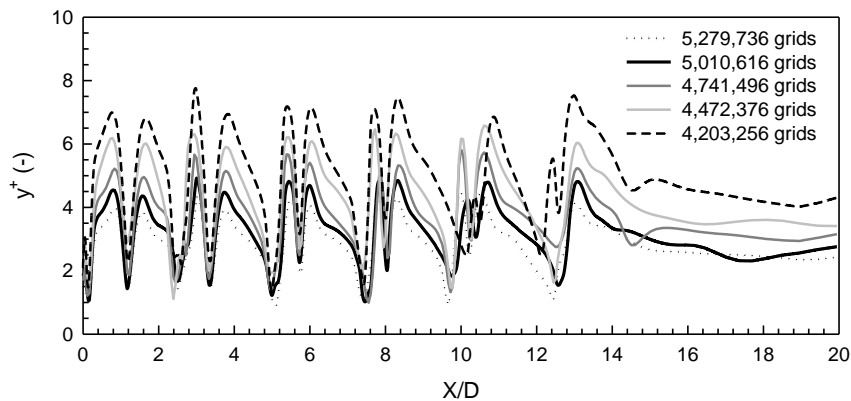


รูปที่ 34 รายละเอียดการสร้างกริดกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

การไหลบริเวณชั้นขีดผนังมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างกะทันหัน ซึ่งบริเวณดังกล่าวต้องการความแม่นยำในการคำนวณสูงจึงมีการกำหนดค่า $y^+ \approx 5$ [22] โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (23) คำนวณบริเวณชั้นขีดผนัง (Near-wall) ที่เจ็ทพุ่งชน รูปที่ 35 แสดงการพิจารณาจำนวนกริดกรณีเจ็ทแถวพุ่งชน พบว่าจำนวนกริด 4,544,844 grids และ 5,012,714 grids ค่า y^+ ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริด 4,544,844 grids และรูปที่ 36 แสดงการพิจารณาจำนวนกริดกรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชน พบว่าจำนวนกริด 5,010,616 grids และ 5,279,736 grids ค่า y^+ ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริด 5,010,616 grids เนื่องจากการเลือกจำนวนของกริดที่ความละเอียดสูงทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณที่นานขึ้น ในการจำลองการไหลได้ใช้วิธีการกำหนดค่าต่างๆ ในการสร้างกริดแบบเดียวกันเพื่อนำไปสร้างกริดในกรณีที่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน



รูปที่ 35 การพิจารณาจำนวนกริดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีเจ็ทแถวพุ่งชน ($Z/D=0$)



รูปที่ 36 การพิจารณาจำนวนกริดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชน ($Z/D=0$)

5.6 ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

ในการจำลองการไหลได้ทำการวิเคราะห์การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady flow) ไม่พิจารณาผลของการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในแบบจำลองมีค่าคงที่ ไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วง สำหรับโมเดลความปั่นป่วนใช้แบบจำลองการไหล Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST) model [23] โดยบริเวณที่ใกล้พื้นผิวกำหนดเป็นแบบไม่มีการลื่นไถล (No slip) และมีความเร็วเป็นศูนย์

5.7 วิธีการคำนวณ

สำหรับวิธีการคำนวณได้กำหนดอัลกอริทึมที่ใช้แบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยรายละเอียดของเงื่อนไขการคำนวณได้กำหนดตามตารางที่ 4 โดยกำหนดเงื่อนไขการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ 1×10^{-5} [24]

ตารางที่ 4 การกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไขการคำนวณ [25]

เทอม	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

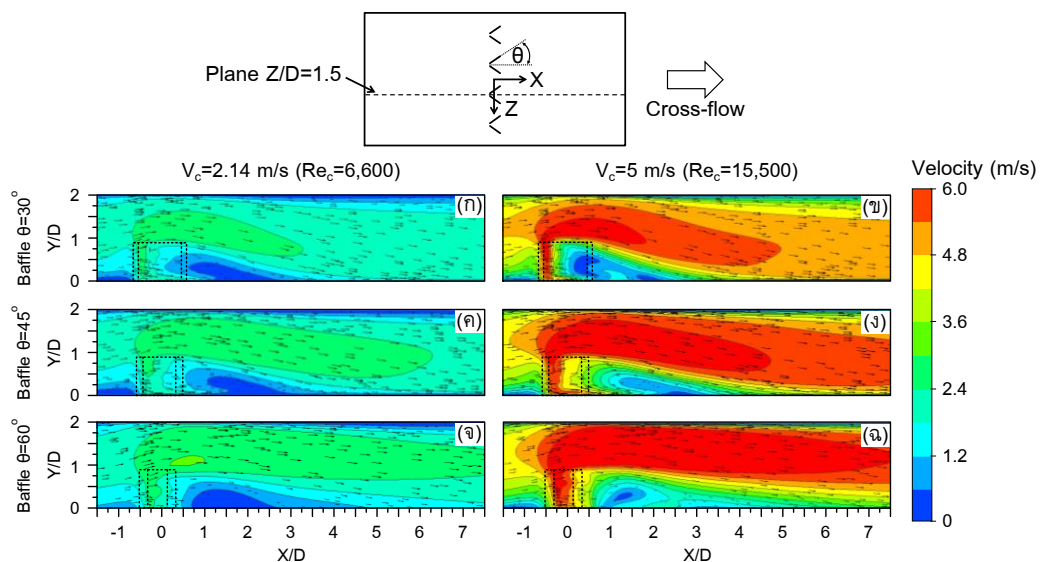
6. ผลการทดลองและอภิปรายผล

6.1 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

ในหัวข้อนี้เป็นผลการศึกษาลักษณะการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่อไป

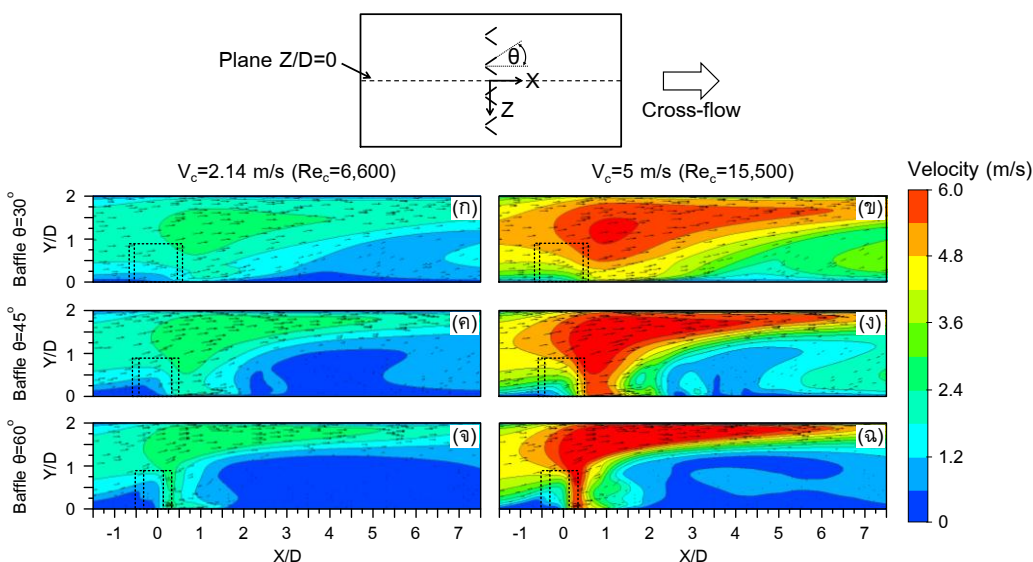
6.1.1 การศึกษาลักษณะการไหลโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

รูปที่ 37 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$ เปรียบเทียบระหว่างกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($V_c=2.14$ m/s) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) โดยภาพรวมพบว่าลักษณะการไหลของกระแสไหลตัดของทั้งสองกรณีมีลักษณะการไหลที่คล้ายกัน จะแตกต่างกันที่ความเร็วของกระแสไหลตัดสังเกตได้จากสีที่เข้มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไหลตัดเกิดการไหลแยกตัวบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนส่งผลให้กระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนมีความเร็วเพิ่มขึ้น กระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 37(จ) และ 37(ฉ) ระยะในการไหลปะทะพื้นผิวของกระแสไหลตัดที่ไหลแยกตัวจากปีกสร้างกระแสหมุนจะห่างออกไปเมื่อมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 37 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$

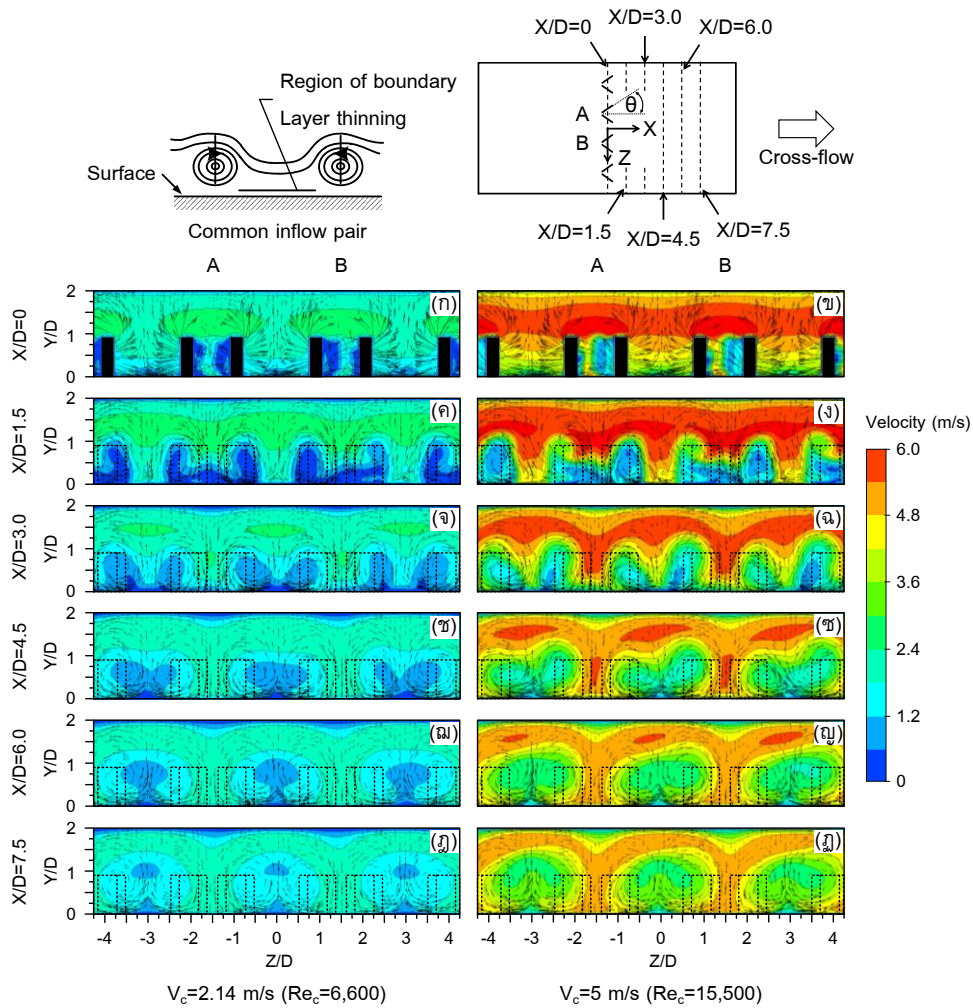
รูปที่ 38 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=0$ เปรียบเทียบระหว่างกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($V_c=2.14$ m/s) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) สังเกตจากรูปที่ 38(ก) และ 38(ข) พบว่ากระแสไหลตัดมีการไหลผ่านระหว่างปีกสร้างกระแสหมุนวนก่อนจะเกิดการไหลแยกตัวจากพื้นผิว เนื่องจากเกิดการเฉือนกันระหว่างกระแสไหลตัดและปีกสร้างกระแสหมุนวนทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนไหลเรียบไปกับพื้นผิวก่อนจะเกิดการไหลแยกตัวจากพื้นผิว จะแตกต่างจากรูปที่ 38(จ) และ 38(ฉ) พบว่ากระแสไหลตัดมีการไหลผ่านระหว่างปีกสร้างกระแสหมุนวนได้น้อย เนื่องจากการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะขนาดใหญ่ส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้กระแสไหลตัดเกิดการไหลแยกตัวบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนวน กระแสไหลตัดที่ไหลแยกตัวบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนวนจะไหลขนานไปกับพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 38 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=0$

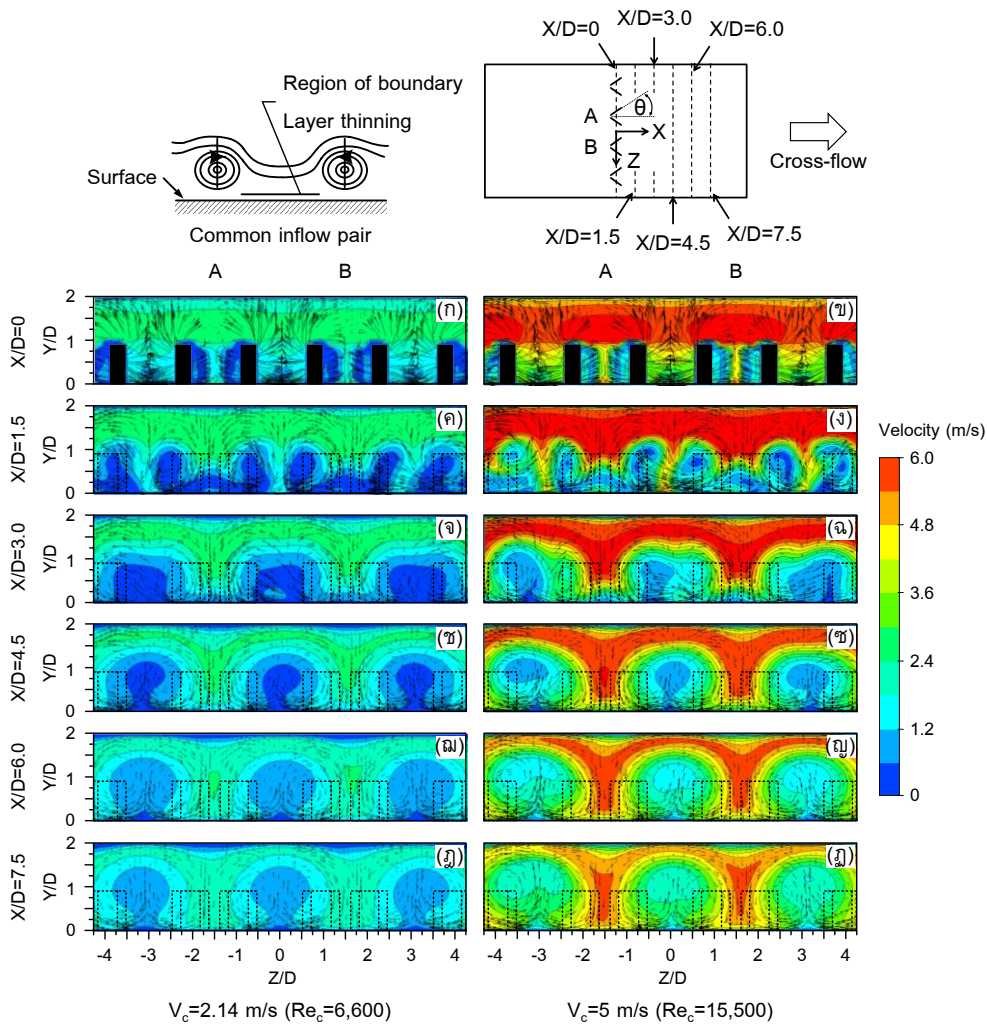
รูปที่ 39, 40 และ 41 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X ต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($V_c=2.14$ m/s) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) พบว่ากระแสไหลตัดที่ไหลแยกตัวบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนวนมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของความเร็วส่งผลให้กระแสไหลตัดที่มีการไหลปะทะปีกสร้างกระแสหมุนวนเกิดการไหลแบบหมุนวนอย่างรุนแรง และความรุนแรงของการหมุนวนจะมีขนาดลดลงเมื่อระยะห่างจากปีกสร้างกระแสหมุนวนเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากขนาดของเวกเตอร์ที่มีขนาดเล็กลง

เมื่อพิจารณาความเร็วของกระแสไหลตัด พบว่าบริเวณที่กระแสไหลตัดไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวน (ระยะ $X/D=0$) กระแสไหลตัดจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นและความเร็วของกระแสไหลตัดจะเริ่มลดลงเมื่อระยะห่างจากปีกสร้างกระแสหมุนวนเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากความเข้มของสีที่ลดลง เมื่อสังเกตการหมุนวนที่เกิดขึ้น พบว่าเกิดการหมุนวนในลักษณะที่หมุนเข้าหากันบริเวณคู่ของปีกสร้างกระแสหมุนวน การหมุนวนที่เกิดขึ้นจะดึงกระแสไหลตัดที่มีความเร็วเข้ามาปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (ระยะ $X/D \approx 3$) ส่งผลให้เกิดการปะทะอย่างรุนแรงทำให้ชั้นขอบเขตการไหลบริเวณนี้มีความหนาลดลง พร้อมกับหมุนวนเอากระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำออกไปจากบริเวณด้านหลังปีกสร้างกระแสหมุนวน การหมุนวนจะขยายตัวและไหลห่างจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อระยะจากบริเวณต้นทางการไหลไปสู่บริเวณปลายทางการไหลของกระแสไหลตัดเพิ่มขึ้น (ระยะ $X/D \approx 6$)

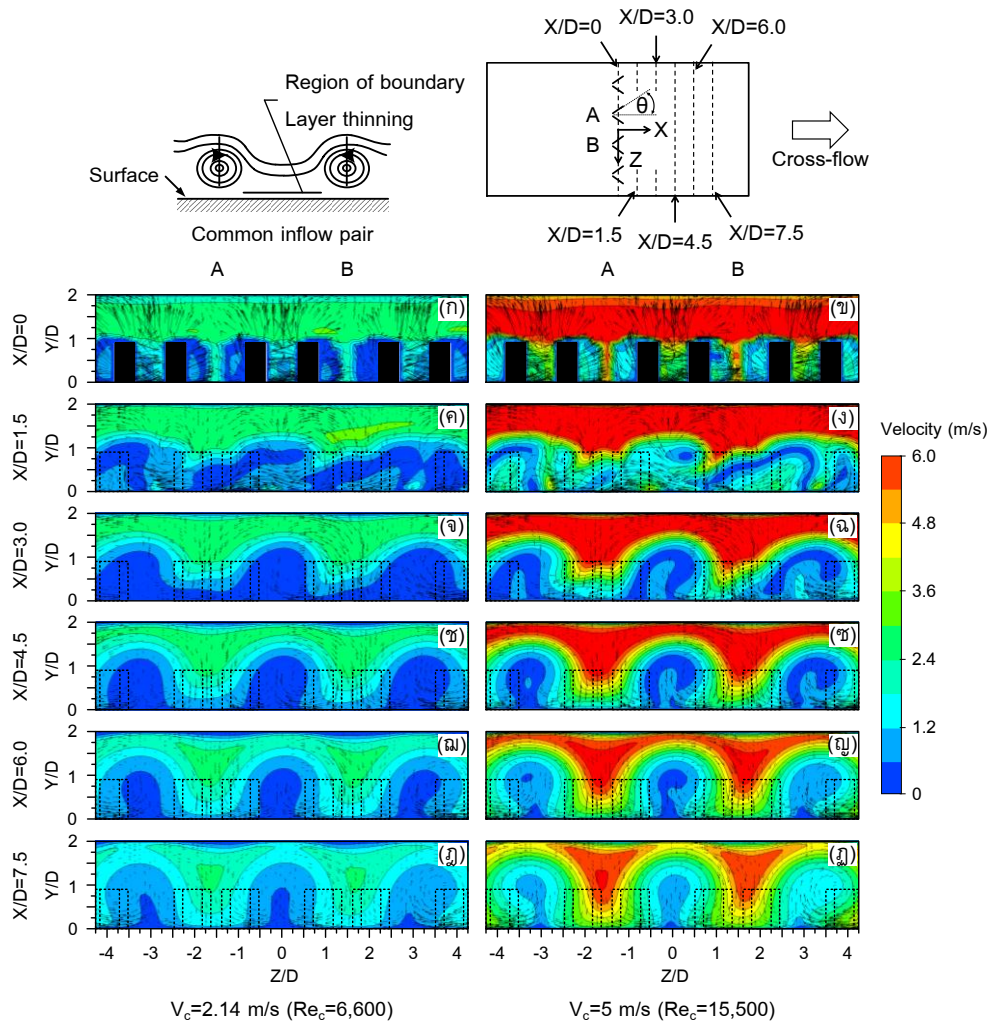


รูปที่ 39 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X ต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$

เมื่อพิจารณาผลของมุมปะทะ พบว่าปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มีมุมปะทะขนาดใหญ่จะส่งผลต่อความเร็วของกระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวน กระแสไหลตัดจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นและความเร็วของกระแสไหลตัดจะลดอีกครั้งเมื่อระยะจากบริเวณต้นทางการไหลไปสู่บริเวณปลายทางการไหลของกระแสไหลตัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการหมุนวนที่เกิดขึ้นมีการขยายตัวมากขึ้นเมื่อมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวนมีขนาดเพิ่มขึ้น การหมุนวนที่เกิดขึ้นจะไหลขนานไปกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 40 และ 41



รูปที่ 40 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X ต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มีมุมปะทะ $\theta = 45^\circ$

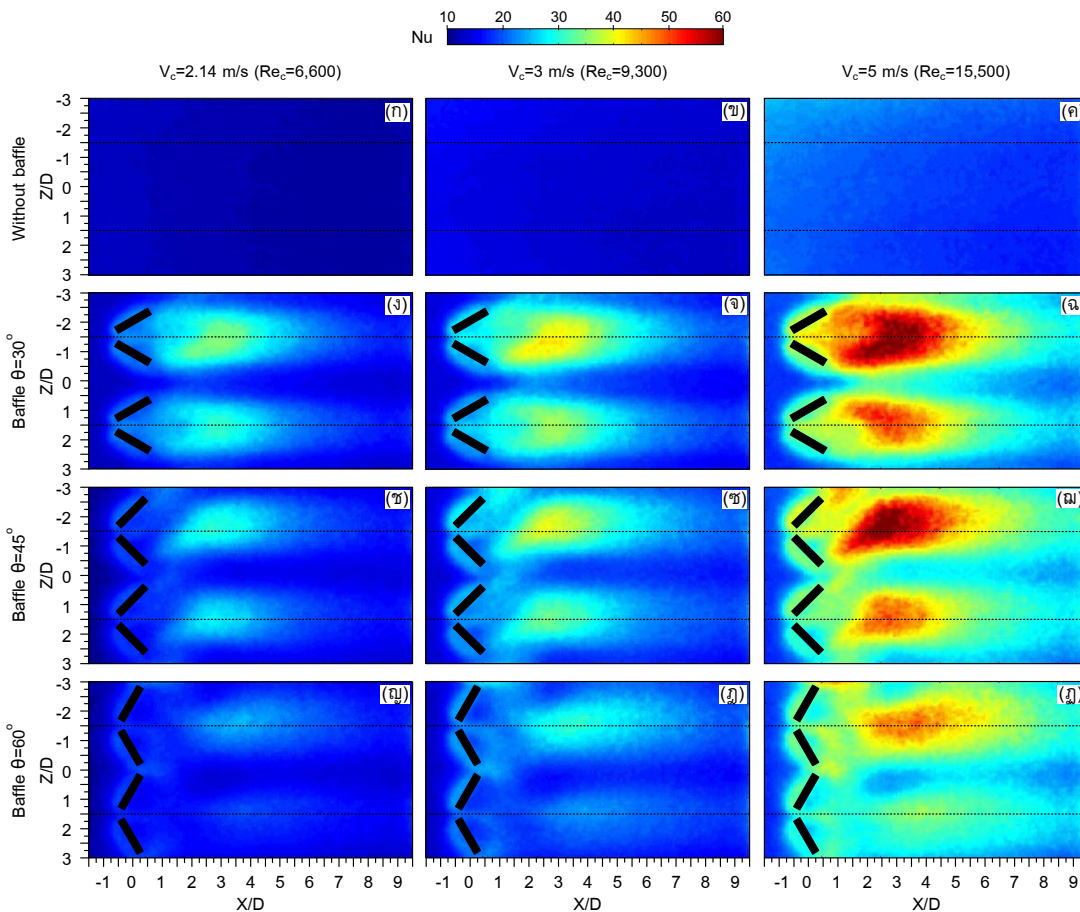


รูปที่ 41 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ตามแนวแกน X ต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$

6.1.2 ผลการทดลองลักษณะการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 42 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยภาพรวมพบว่าการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น (V_c เพิ่มขึ้น) สำหรับกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้นบริเวณที่ให้นัสเซลล์ต์นัมเบอร์สูงสุดคือบริเวณที่กระแสไหลตัดไหลปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง ($Nu > 50$) มีการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์ไปยังบริเวณปลายทางการไหลเนื่องจากได้อิทธิพลของกระแสไหลตัด การกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์จะลดลงตามการไหลของกระแสไหลตัดเมื่อ

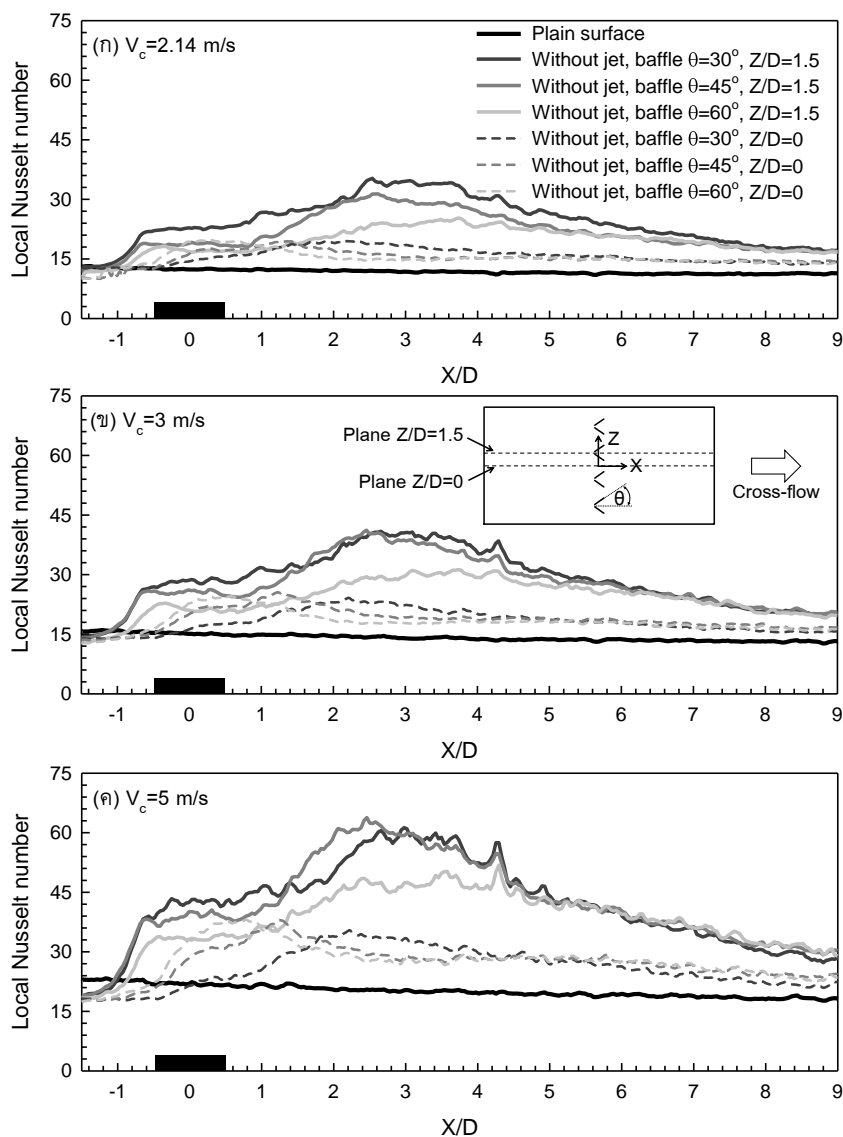
ระยะจากบริเวณต้นทางการไหลไปสู่บริเวณปลายทางการไหลของกระแสไหลตัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนทำให้การกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บริเวณรอบปีกสร้างกระแสมุขวนและบริเวณด้านหลังของปีกสร้างกระแสมุขวนมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการหมุนวนที่ดึงกระแสไหลตัดที่มีความเร็วเข้ามาปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณด้านหลังของปีกสร้างกระแสมุขวน ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านหลังของปีกสร้างกระแสมุขวนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ที่ได้จากการศึกษาการจำลองลักษณะการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 39, 40 และ 41



รูปที่ 42 ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณาผลของมุมปะทะ พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนที่มุมปะทะขนาดเล็กส่งผลให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสมุขวนที่มุมปะทะขนาดใหญ่ เนื่องจากกระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกกระแสมุขวนจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยส่งผลให้ระยะในการไหลปะทะพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสั้นและรุนแรง สอดคล้องกับ

ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ได้จากการศึกษาการจำลองลักษณะการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 37(ก) และ 37(ข) เมื่อมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวนเพิ่มขึ้น กระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวนจะมีความเร็วเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูงไหลขนาดกัปพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นระยะทางที่ยาวทำให้เสียโมเมนตัมในการไหลปะทะพื้นผิวซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ได้จากการศึกษาการจำลองลักษณะการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 37(จ) และ 37(ฉ)



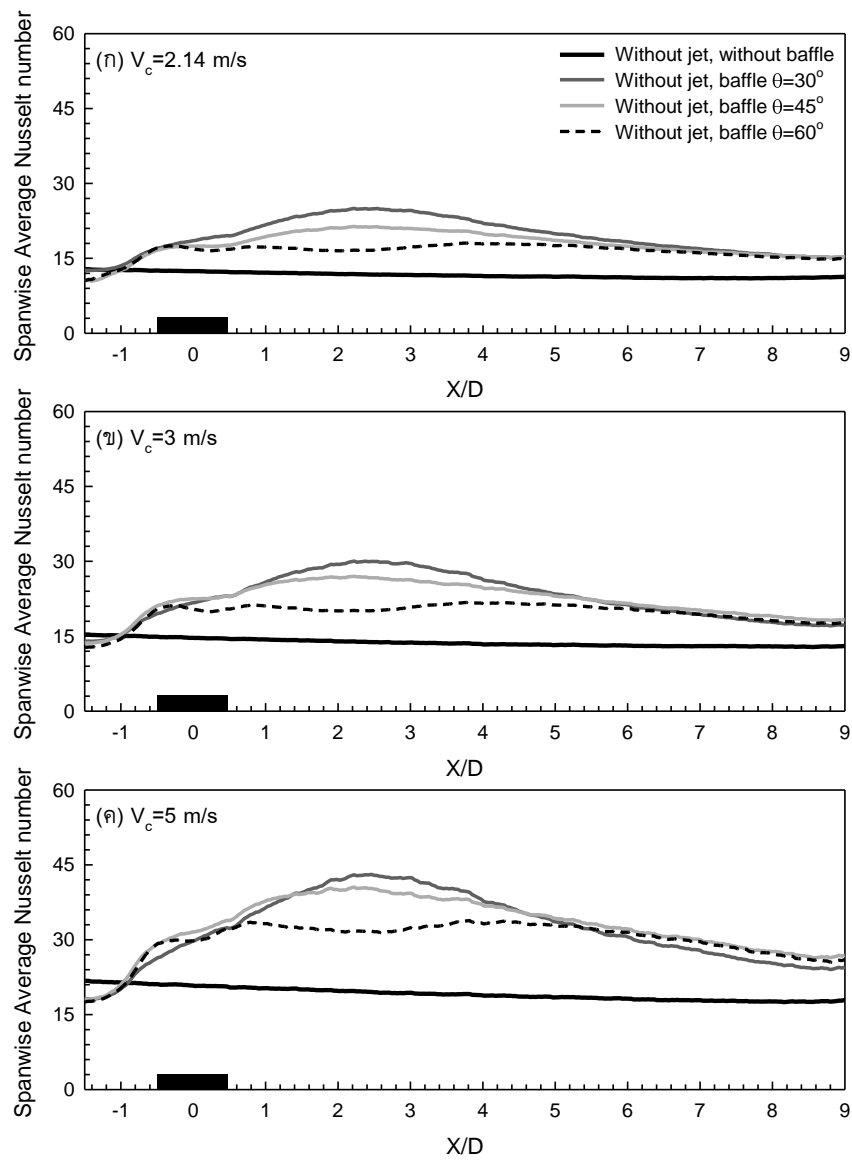
รูปที่ 43 ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 43 แสดงลักษณะการกระจายของน้ำเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยภาพรวมพบว่าลักษณะการกระจายของน้ำเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนจะเริ่มสูงขึ้นบริเวณด้านหน้าปีกสร้างกระแสหมุนวนและจะสูงสุดบริเวณที่กระแสไหลตัดไหลปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง น้ำเซลล์ต์นัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการไหลปะทะระหว่างกระแสไหลตัดและปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณด้านหน้าและบริเวณด้านหลังปีกสร้างกระแสหมุนวนเมื่อพิจารณาผลของความเร็วกระแสไหลตัด พบว่าลักษณะการกระจายของน้ำเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($V_c=2.14$ m/s) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วปานกลาง ($V_c=3$ m/s) การกระจายน้ำเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน กระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) ให้การกระจายของน้ำเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสูงที่สุด

เมื่อพิจารณาผลของมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวนที่ระยะ $X/D=1.5$ พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะขนาดเล็กให้ผลการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะขนาดใหญ่ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระยะ $X/D=0$ พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะขนาดใหญ่ให้ผลการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะขนาดเล็กเนื่องจากเกิดการหมุนวนขนาดใหญ่บริเวณด้านหลังของปีกสร้างกระแสหมุนวนทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่สูงกว่ามุมปะทะขนาดเล็ก

6.1.3 น้ำเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

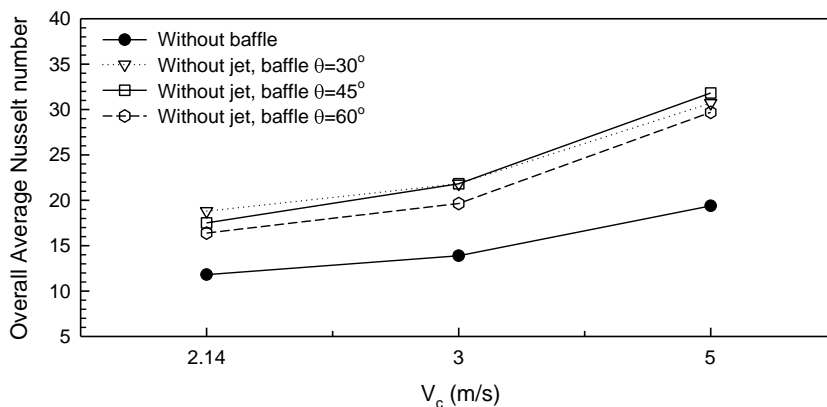
รูปที่ 44 แสดงน้ำเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน น้ำเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลคำนวณจากสมการที่ (5) โดยใช้อนุกรมเฉลี่ยในช่วง $-3 \leq Z/D \leq 3$ ที่ระยะ X/D ต่างๆ โดยภาพรวมพบว่าน้ำเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าบริเวณด้านหน้าของปีกสร้างกระแสหมุนวนให้น้ำเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลใกล้เคียงกัน น้ำเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลจะเริ่มสูงขึ้นบริเวณด้านหน้าปีกสร้างกระแสหมุนวน และค่าสูงสุดจะเกิดบริเวณด้านหลังปีกสร้างกระแสหมุนวน น้ำเซลล์ต์นัมเบอร์ที่มีความแตกต่างกันเป็นผลมาจากมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวน นอกจากนี้ยังพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ เพียงกรณีเดียวที่ให้น้ำเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลเริ่มสูงขึ้นบริเวณด้านหน้าปีกสร้างกระแสหมุนวนและมีค่าเกือบจะคงที่ตลอดระยะ X/D แสดงให้เห็นว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสม่ำเสมอทั้งพื้นผิว



รูปที่ 44 นั้สเซลต์นั้มเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

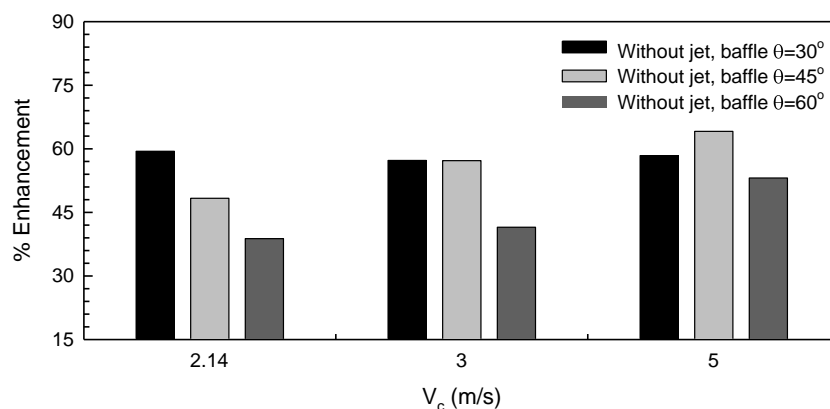
6.1.4 การเปรียบเทียบนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 45 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยภาพรวมพบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน นอกจากนี้ยังพบว่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วของกระแสไหลตัดลดลง (V_c ลดลง) สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($V_c=2.14$ m/s) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด รองลงมาเป็นกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$ และ 60° ตามลำดับ สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วปานกลาง ($V_c=3$ m/s) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ และ 45° ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด โดยผลต่างของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของมุมปะทะทั้งสองแตกต่างกันไม่มาก รองลงมาเป็นกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$ ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด รองลงมาเป็นกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ และ 60° ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของมุมปะทะที่มีผลต่อนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวต่ำกว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ และ $\theta=45^\circ$ แต่ยังคงสูงกว่ากรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน



รูปที่ 45 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

รูปที่ 46 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน โดยภาพรวมพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($V_c=2.14$ m/s) พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 59.41%, 48.31% และ 38.80% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วปานกลาง ($V_c=3$ m/s) พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 57.24%, 57.19% และ 41.50% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 58.39%, 64.10% และ 53.10% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน



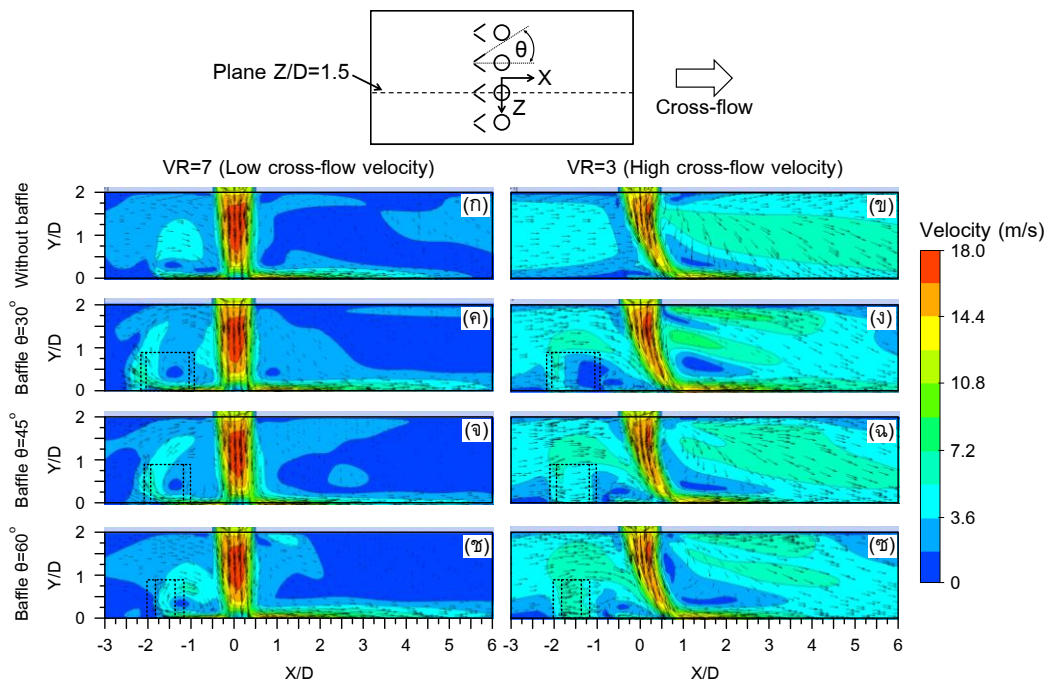
รูปที่ 46 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน

6.2 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน

ในหัวข้อนี้เป็นผลการศึกษาคณิตศาสตร์ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชนเพื่อศึกษาลักษณะการไหลโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลระหว่างการไหลของเจ็ทและกระแสไหลตัด (Cross-flow) เมื่อมีการไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวน เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่อไป

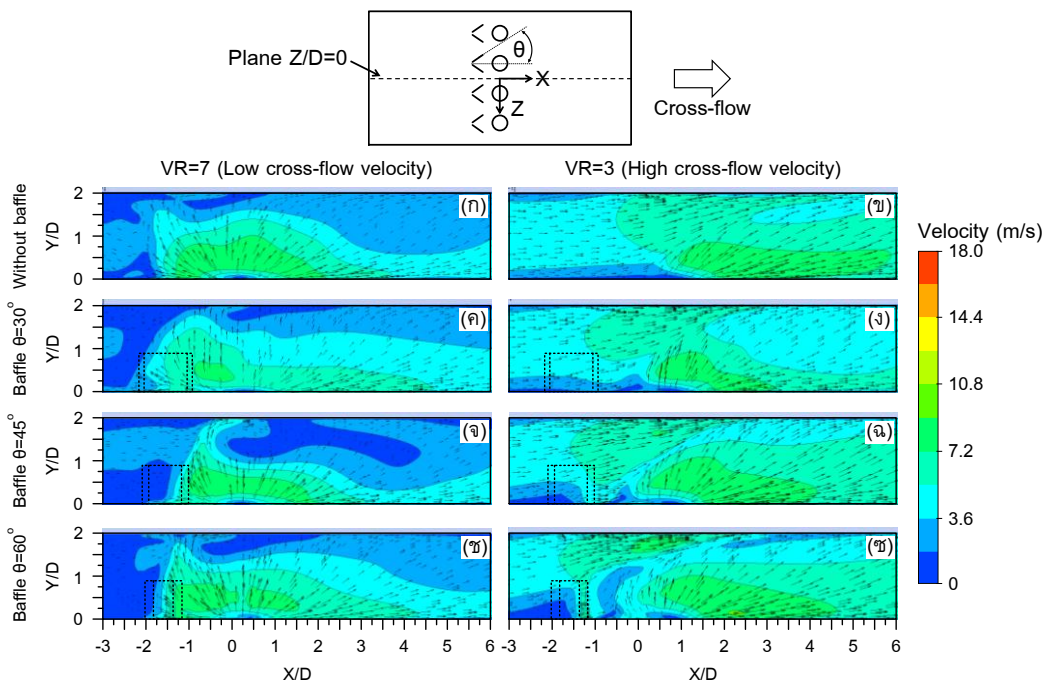
6.2.1 การศึกษาลักษณะการไหลโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

รูปที่ 47 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$ เปรียบเทียบระหว่างกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่าสำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ลำเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวอย่างรุนแรงและมีการโน้มเอียงไปยังบริเวณปลายทางการไหลเล็กน้อยเนื่องจากได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าเจ็ทผนังที่เกิดขึ้นบริเวณต้นทางการไหลจะเกิดการหมุนวนและไหลเข้าผสมกับการไหลของลำเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 47(ก) สำหรับกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ และ $\theta=60^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 47(ค), 47(จ) และ 47(ช) ตามลำดับ พบว่าเกิดการหมุนวนขนาดใหญ่บริเวณต้นทางการไหลทำให้เกิดการผสมกับการไหลของลำเจ็ทได้มากขึ้น



รูปที่ 47 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$ (เจ็ทอากาศ, $Re=13,400$)

สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่าลำเจ็ทมีการโน้มเอียงไปยังบริเวณปลายทางการไหลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหมุนวนขนาดเล็กบริเวณต้นทางการไหล การไหลของเจ็ทผนังบริเวณปลายทางการไหลจะไหลเรียบกับพื้นผิวตามทิศทางการไหลของกระแสไหลตัดดังแสดงในรูปที่ 47(ข) สำหรับกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ และ $\theta=60^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 47(ง), 47(ฉ) และ 47(ช) ตามลำดับ พบว่ากระแสไหลตัดจะเกิดการไหลแยกตัวบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้กระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น เมื่อกระแสไหลตัดไหลปะทะกับลำเจ็ทจะเกิดการผสมอย่างรุนแรงก่อนพุ่งชนพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบว่าการหมุนวนบริเวณต้นทางการไหลของลำเจ็ทจะหายไป

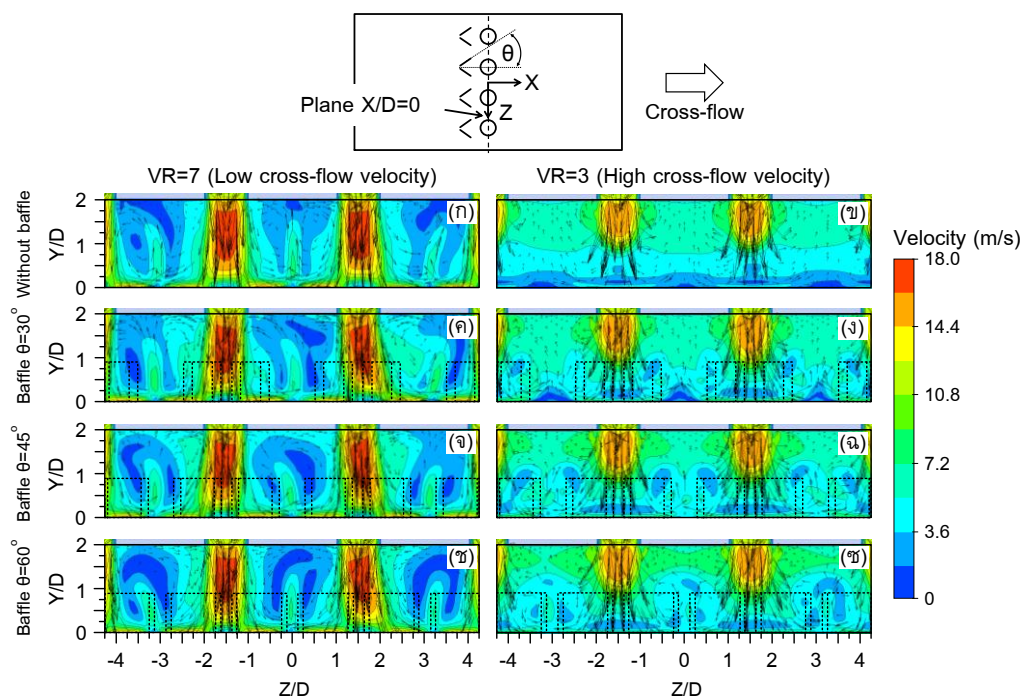


รูปที่ 48 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=0$ (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

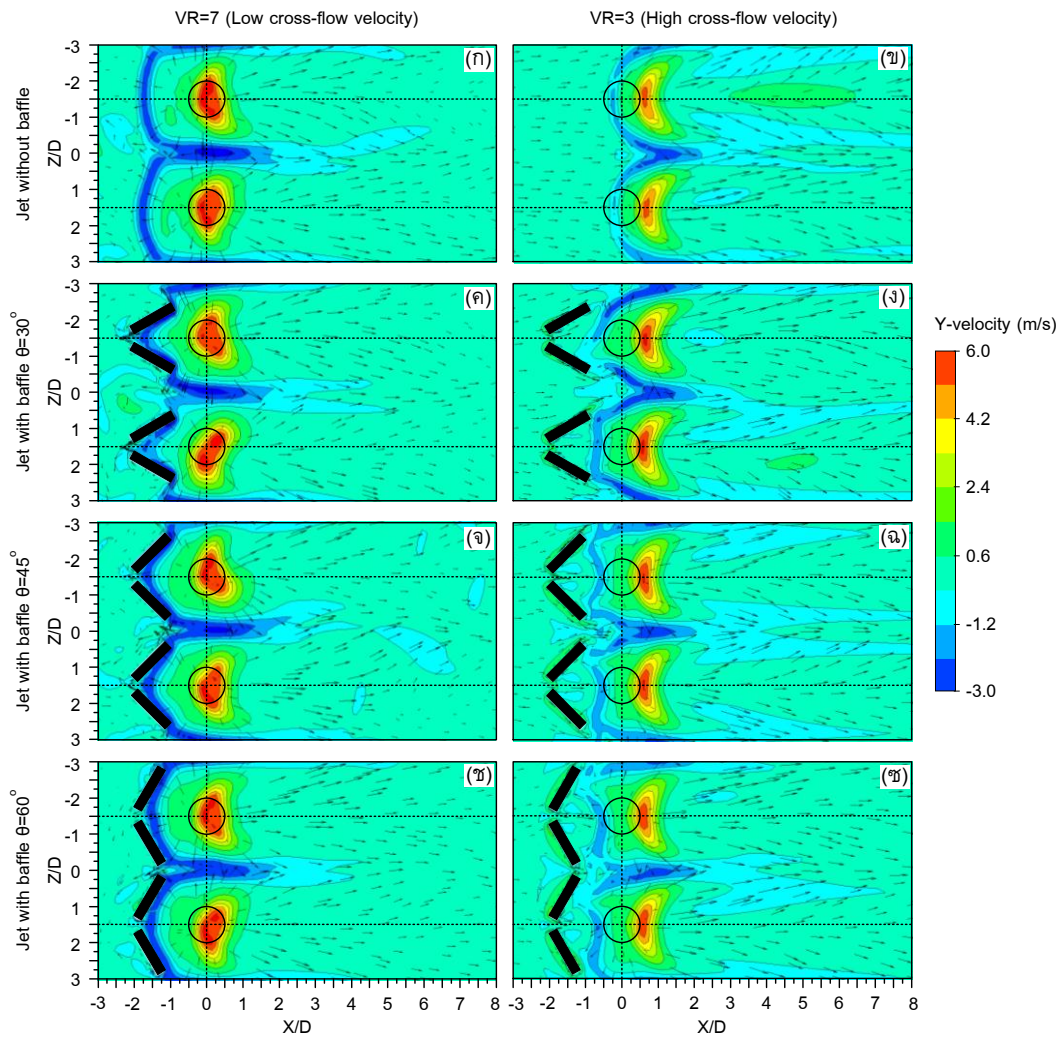
รูปที่ 48 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=0$ เปรียบเทียบระหว่างกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่ากระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ การไหลของเจ็ทผนังที่เกิดขึ้นหลังจากลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวสังเกตเห็นว่าเกิดการไหลจากบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนไปยังบริเวณต้นทางการไหลก่อนจะมีการไหลไปยังผนังด้านบน สำหรับกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน พบว่าเจ็ทผนังมีการไหลปะทะบริเวณด้านหลังของปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้เจ็ทผนังเกิดการไหลแยกตัวบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนวนก่อนไหลปะทะพื้นผิวด้านบน เมื่อมุมปะทะ

ของปีกสร้างกระแสหมุนวนมีขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 48(จ) และ 48(ช) เกิดการไหลของเจ็ทพุ่งออกจากพื้นผิวอย่างรุนแรง เนื่องจากการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะกว้างจะไปขวางการไหลของกระแสไหลตัดส่งผลให้ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวอย่างรุนแรง (ลำเจ็ทไม่ได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัด) สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง สังเกตว่าอิทธิพลของกระแสไหลตัดส่งผลให้เจ็ทผนังที่เกิดขึ้นมีการไหลไปยังบริเวณปลายทางการไหลทั้งหมด

รูปที่ 49 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ที่ระยะ $X/D=0$ เปรียบเทียบระหว่างกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่ากระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ลำเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวอย่างรุนแรงเนื่องจากได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำทำให้ลำเจ็ทมีการโน้มเอียงไปยังบริเวณปลายทางการไหลเล็กน้อย ส่งผลให้เจ็ทผนังที่เกิดขึ้นหลังจากที่ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเกิดการไหลไปยังพื้นผิวด้านบน โดยบางส่วนได้ไหลวนเข้าผสมกับการไหลของลำเจ็ท และบางส่วนได้ไหลเข้าผสมกับกระแสไหลตัด การหมุนวนมีการขยายตัวมากขึ้นเมื่อมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวนเพิ่มขึ้น สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่าความรุนแรงในการพุ่งชนพื้นผิวดลดลง ลำเจ็ทไม่มีการพุ่งชนพื้นผิวเนื่องจากผลของกระแสไหลตัดที่รุนแรงทำให้เจ็ทถูกพัดไปยังบริเวณปลายทางการไหลและพุ่งชนกับพื้นผิวในบริเวณที่ห่างออกมาจากปากทางออกของเจ็ทเกิดการหมุนวนที่รุนแรงบริเวณระหว่างลำเจ็ท



รูปที่ 49 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Y-Z ที่ระยะ $X/D=0$ (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)



รูปที่ 50 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ที่ระยะสูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1.5 mm (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

รูปที่ 50 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ที่ระยะสูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1.5 mm เปรียบเทียบระหว่างกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) และกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่าความเร็วที่เป็นบวกแสดงถึงทิศทางของความเร็วลำเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว และความเร็วที่เป็นลบแสดงถึงทิศทางของความเร็วลำเจ็ทที่พุ่งขึ้นมาจากพื้นผิว ซึ่งเกิดจากการไหลปะทะระหว่างเจ็ทหนึ่งแล้วไหลขึ้นจากพื้นผิวที่ลำเจ็ทพุ่งชน นอกจากนี้ยังแสดงเวกเตอร์เพื่อแสดงทิศทางการไหลบนระนาบ Z-X สำหรับบริเวณที่มีความเร็วในแนวแกน Y สูงสุดหมายถึงบริเวณที่เป็นจุดศูนย์กลางที่ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว (Stagnation point) สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) พบว่าจุดศูนย์กลางที่ลำเจ็ทพุ่งชนเป็นบริเวณเดียวกับที่เจ็ทไหลออกจากออรัลฟิส สำหรับกระแส

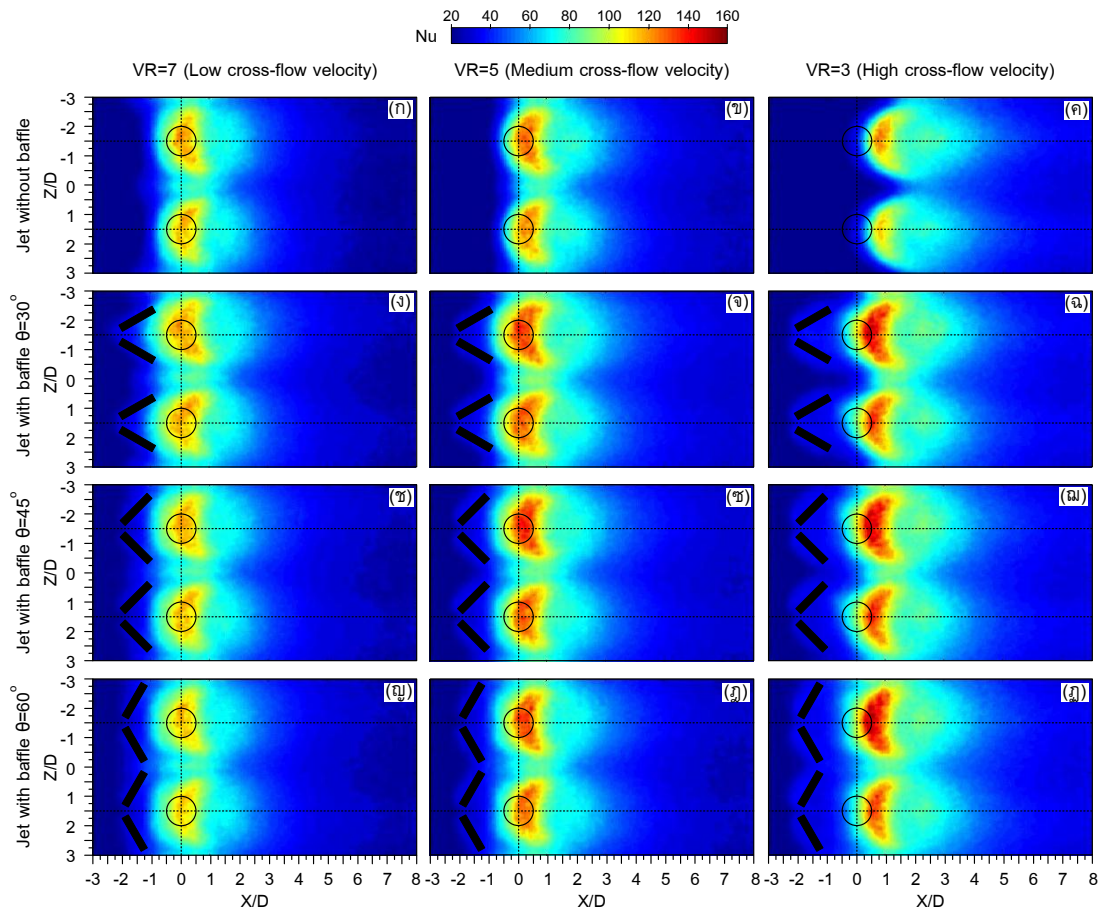
ไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่าจุดศูนย์กลางที่ลำเจ็ทพุ่งชนเลื่อนไปทางด้านปลายทางการไหลมากขึ้น สำหรับการเลื่อนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางที่ลำเจ็ทพุ่งชนมากขึ้นจะสอดคล้องกับความเร็วของกระแสไหลตัดที่เพิ่มขึ้น

6.2.2 ผลการทดลองลักษณะการกระจายของน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน

รูปที่ 51 แสดงการกระจายของน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน พบว่าเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น (VR ลดลง) บริเวณที่ให้น้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์สูงคือบริเวณที่ลำเจ็ทพุ่งชนโดยตรง ($Nu > 120$) มีการเลื่อนตำแหน่งไปยังบริเวณปลายทางการไหลเนื่องจากได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง การกระจายน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์บริเวณต้นทางการไหลจะต่ำลงเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ที่ได้จากการศึกษาการจำลองลักษณะการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 50 นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์บริเวณปลายทางการไหลจะสูงขึ้นเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน โดยภาพรวมพบว่าการกระจายของน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์บริเวณรอบปีกสร้างกระแสหมุนวนเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนจะช่วยขวางการไหลของกระแสไหลตัดในบริเวณต้นทางการไหล ส่งผลให้ลำเจ็ทสามารถพุ่งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้รุนแรงขึ้น สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนจะทำให้เกิดการไหลแยกตัวของกระแสไหลตัดบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนวนแล้วเกิดการผสมของลำเจ็ทและกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูงทำให้เกิดการไหลปั่นป่วนก่อนที่ลำเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีการขยายไปยังบริเวณปลายทางการไหลเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่กระแสไหลตัดความเร็วเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 52 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ดังแสดงในรูปที่ 47

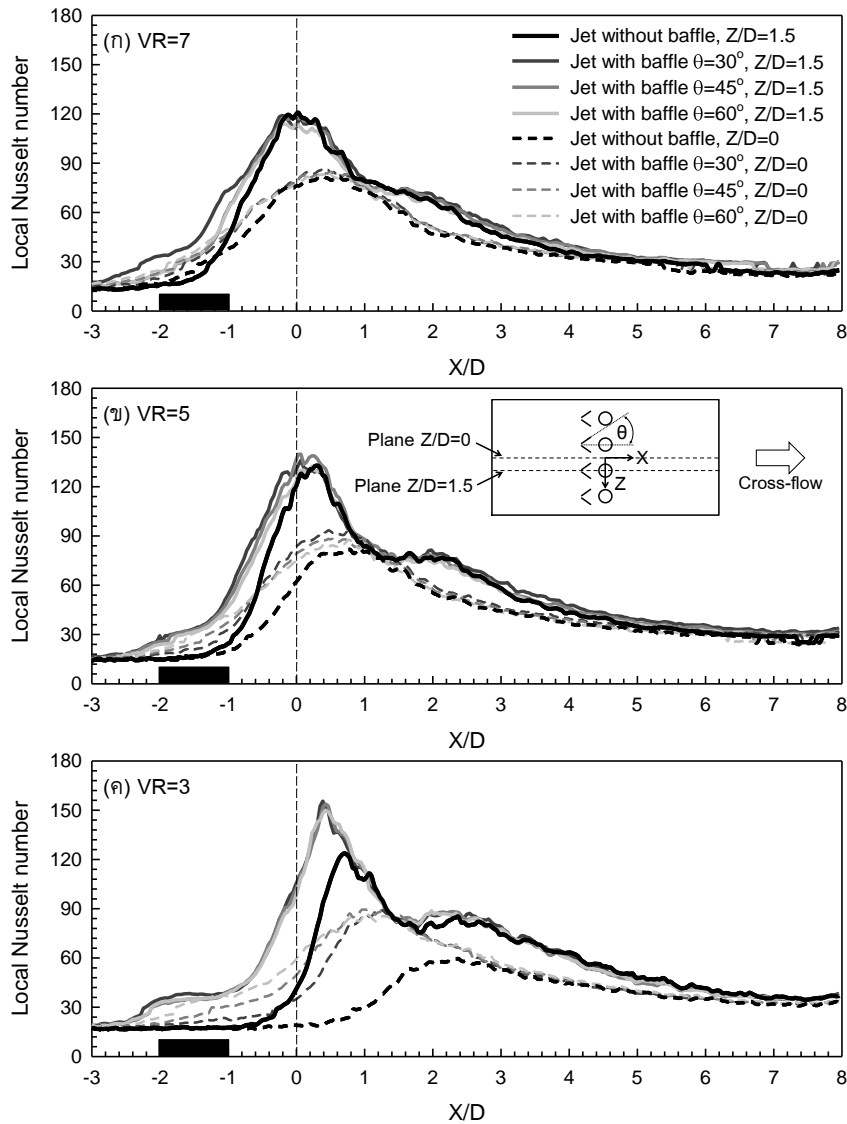
เมื่อพิจารณาผลของมุมปะทะ พบว่าปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะขนาดใหญ่สามารถขวางการไหลของกระแสไหลตัดได้เยอะขึ้นส่งผลให้ลำเจ็ทไม่ได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัด การถ่ายความร้อนบริเวณรอบปีกสร้างกระแสหมุนวนที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการไหลปะทะของกระแสไหลตัดและปีกสร้างกระแสหมุนวน และเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้นการหมุนวนจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงทำให้บริเวณที่ให้ค่าน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์สูง ($Nu > 140$) มีขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 51(ก) นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) การกระจายของน้ำสเซลล์ต์นัมเบอร์ตามการไหลของกระแสไหลตัดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 51 ลักษณะการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน
(เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

รูปที่ 52 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่ง โดยภาพรวมพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระหมუნวนทำให้การกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวบริเวณต้นทางการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น และบริเวณที่ลำเจ็ทพุ่งชนมีค่าสูงกว่ากรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสมุนวน นอกจากนี้ยังพบว่าสำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) มุมปะทะขนาดเล็กจะให้นัสเซลล์ต์นัมเบอร์สูงกว่ามุมปะทะขนาดใหญ่ในบริเวณต้นทางการไหล ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะการไหลดังแสดงในรูปที่ 47(ค) จะสังเกตเห็นว่ามุมปะทะขนาดเล็ก ($\theta=30^\circ$) เจ็ทหนึ่งบริเวณต้นทางการไหลมีการไหลเรียบไปกับพื้นผิวในบริเวณต้นทางการไหลได้ยาวกว่ากรณีมุมปะทะขนาดใหญ่ ($\theta=60^\circ$) ดังแสดงในรูปที่ 47(ข) สำหรับกรณีกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) การกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บริเวณต้นทางการไหลจะมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ระยะ $X/D=0$ (ผ่านกลางระหว่างท่อเจ็ท) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระหมუნวนทำให้การกระจายของนัสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวบริเวณต้นทางการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น

มุมปะทะขนาดใหญ่ให้หีสเซลล์ต์นัมเบอร์สูงกว่ามุมปะทะขนาดเล็กในบริเวณต้นทางการไหล สำหรับบริเวณปลายทางการไหลให้หีสเซลล์ต์นัมเบอร์มีค่าไม่แตกต่างกัน

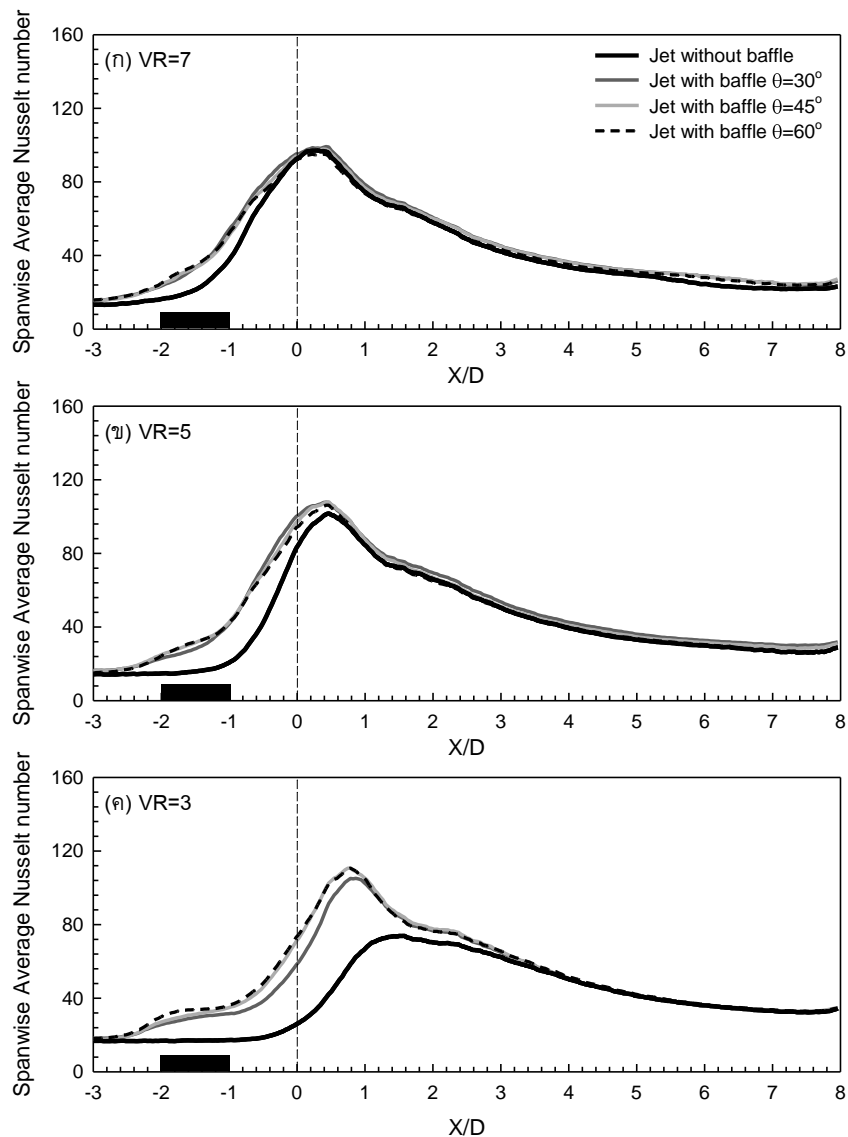


รูปที่ 52 ลักษณะการกระจายของหีสเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

6.2.3 หีสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลที่เจ็ทแถวพุ่งชน

รูปที่ 53 แสดงหีสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลบนพื้นผิวที่เจ็ทแถวพุ่งชน โดยภาพรวมพบว่าหีสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลของเจ็ทพุ่งชนมีการเลื่อนตำแหน่งไปยังบริเวณปลายทางการไหลเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน พบว่าบริเวณด้านหน้าของปีกสร้างกระแสหมุนวนให้หีสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ย

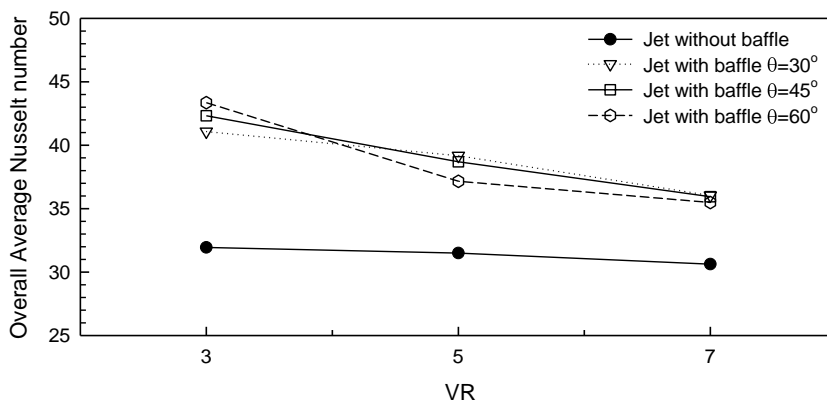
ใกล้เคียงกัน ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยจะเริ่มสูงขึ้นบริเวณด้านหน้าปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับบริเวณที่ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะให้สัมประสิทธิ์นัมเบอร์สูงสุด ยกเว้นกระแสไหลที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) ในบริเวณต้นทางการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ ให้สัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลของเจ็ทพุ่งชนต่ำกว่ามุมปะทะขนาดอื่นแต่ยังคงสูงกว่ากรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน ในบริเวณปลายทางการไหลให้สัมประสิทธิ์นัมเบอร์ที่มีค่าไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 53 สัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลที่เจ็ทแฉกพุ่งชน (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

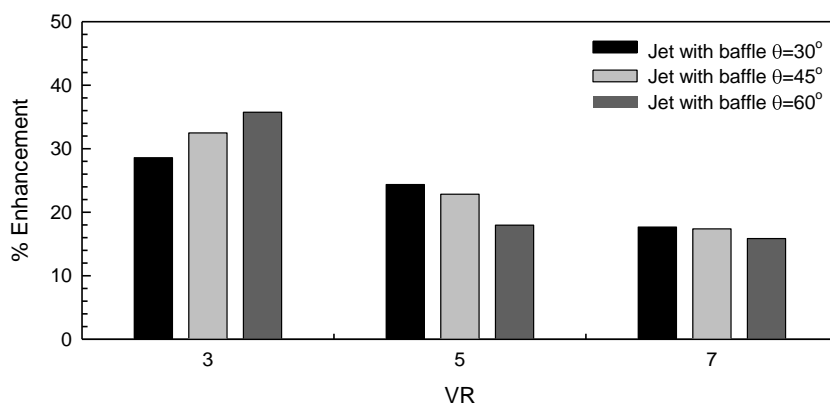
6.2.4 การเปรียบเทียบนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวที่เจ็ทแถวฟุ้งชน

รูปที่ 54 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวที่เจ็ทแถวฟุ้งชนในช่วง $-3 \leq X/D \leq 8$ และ $-3 \leq Z/D \leq 3$ โดยภาพรวมพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแถวฟุ้งชนสามารถให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน นอกจากนี้ยังพบว่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วของกระแสไหลตัดลดลง (VR เพิ่มขึ้น) สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง (VR=3) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด รองลงมาเป็นการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$ และ 30° ตามลำดับ สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วปานกลาง (VR=5) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$ ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด รองลงมาเป็นการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ และ 30° ตามลำดับ สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ (VR=7) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ และ 45° ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด โดยผลต่างของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของมุมปะทะทั้งสองแตกต่างกันไม่มาก รองลงมาเป็นการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ สำหรับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวต่ำสุด



รูปที่ 54 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของเจ็ทแถวฟุ้งชน (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

รูปที่ 55 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซลล์ต์นมเบอร์เจลีย์ทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวของเจ็ทแถวฟุ้งชนเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน โดยภาพรวมพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวของเจ็ทแถวฟุ้งชนสามารถให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซลล์ต์นมเบอร์เจลีย์เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซลล์ต์นมเบอร์เจลีย์ทั้งพื้นผิวสูงกว่า 28.58%, 32.49% และ 35.73% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วปานกลาง ($VR=5$) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซลล์ต์นมเบอร์เจลีย์ทั้งพื้นผิวสูงกว่า 24.36%, 22.83% และ 17.95% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซลล์ต์นมเบอร์เจลีย์ทั้งพื้นผิวสูงกว่า 17.65%, 17.36% และ 15.85% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน



รูปที่ 55 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซลล์ต์นมเบอร์เจลีย์ทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวของเจ็ทแถวฟุ้งชนเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทแถวฟุ้งชนพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน (เจ็ทอากาศ, $Re=13,400$)

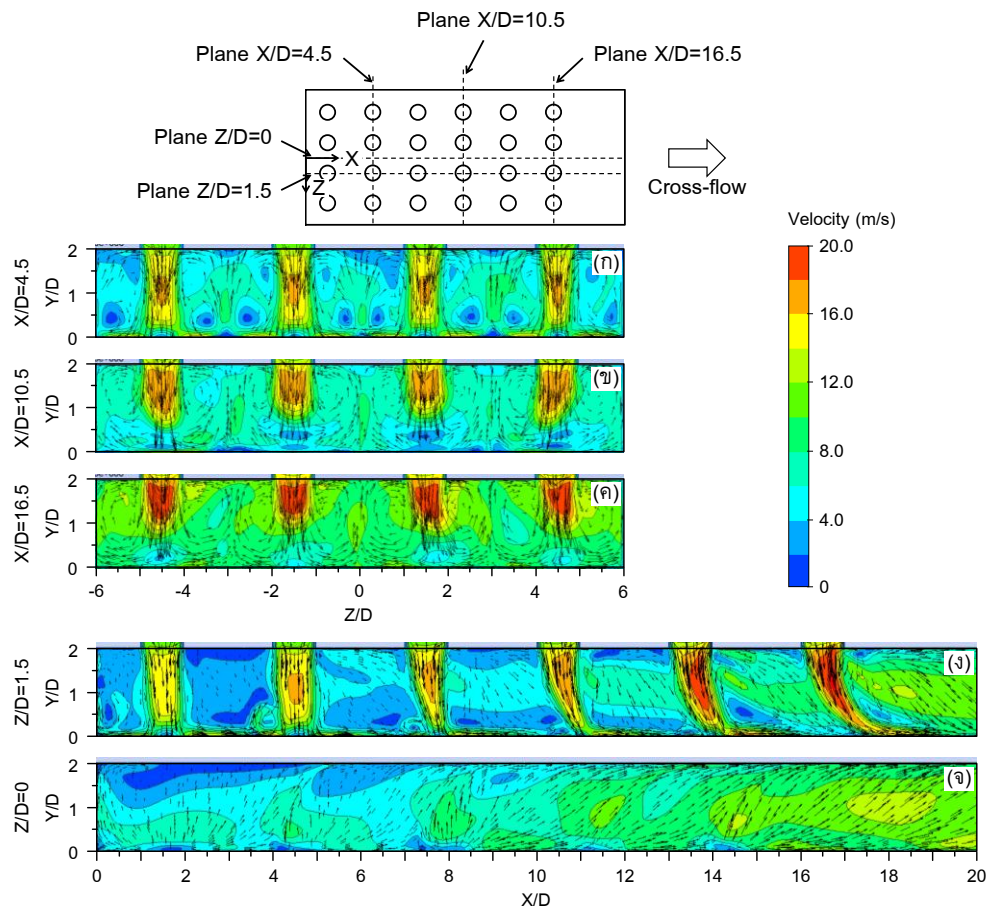
5.3 กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

ในหัวข้อนี้เป็นผลการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนระหว่างการไหลของเจ็ทและกระแสไหลตัด (Cross-flow) ที่เกิดจากการสะสมของเจ็ทบริเวณต้นทางการไหลเมื่อมีการไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวน เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

5.3.1 การศึกษาลักษณะการไหลโดยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

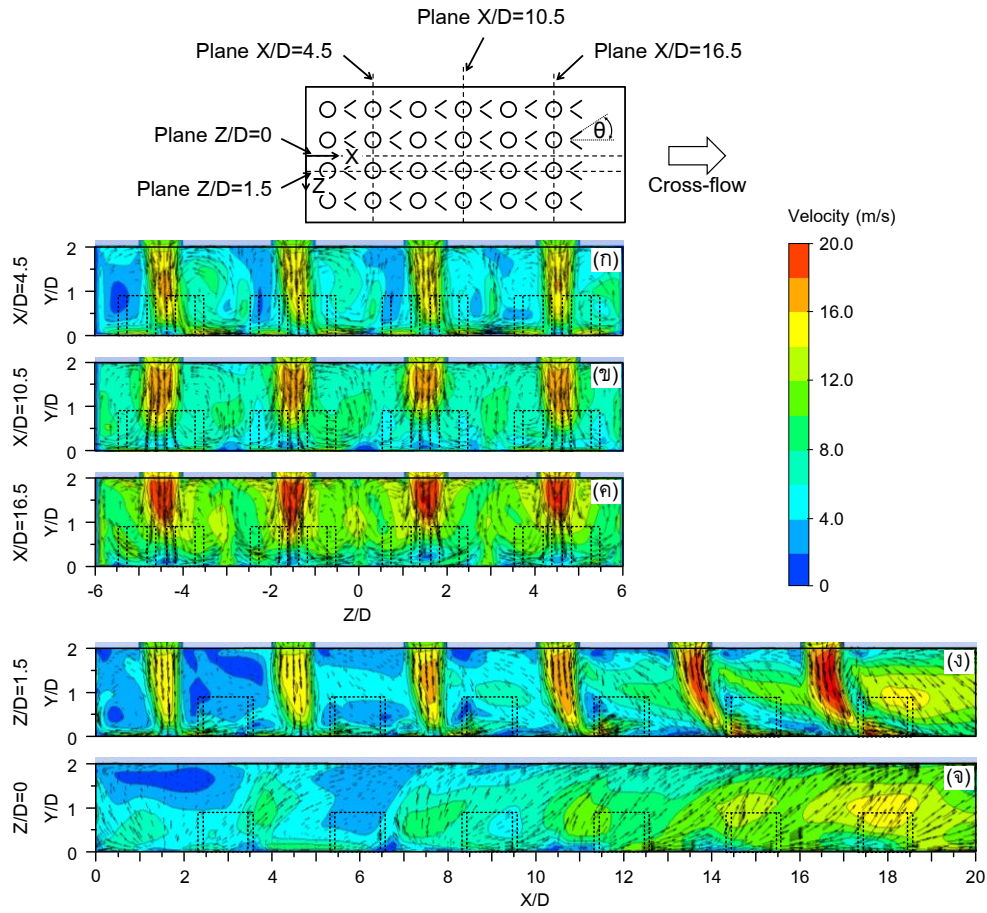
รูปที่ 56, 57, 58 และ 59 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ โดยภาพรวมพบว่าหลังจากลำเจ็ทไหลออกจากออร์ริฟิสพุ่งชนพื้นผิวจะไหลรวมตัวกันเป็นกระแสไหลตัด (Cross-flow) ไหลปะทะกับลำเจ็ทที่อยู่บริเวณปลายทางการไหล กระแสไหลตัดจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากบริเวณต้นทางการไหลไปสู่บริเวณปลายทางการไหล ดังนั้นลำเจ็ทที่อยู่บริเวณปลายทางการไหลจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าลำเจ็ทที่อยู่บริเวณต้นทางการไหลดังแสดงในรูปที่ 57(ง), 58(ง), 59(ง) และ 60(ง) ทำให้บริเวณที่ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวบริเวณปลายทางการไหลเลื่อนตำแหน่งตามทิศทางการไหลของกระแสไหลตัด โดยบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนของลำเจ็ทแต่ละลำเลื่อนไปตามการไหลของกระแสไหลตัดมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากบริเวณต้นทางการไหลไปสู่บริเวณปลายทางการไหล

รูปที่ 56 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ตามแนวแกน X และ Z ต่างๆ กรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน พบว่าลำเจ็ทที่อยู่บริเวณต้นทางการไหลดังแสดงในรูปที่ 56(ก) พุ่งชนพื้นผิวอย่างรุนแรงเนื่องจากเป็นบริเวณที่กระแสไหลตัดมีความเร็วต่ำ สำหรับลำเจ็ทที่อยู่ในตำแหน่งห่างออกจากบริเวณต้นทางการไหลดังแสดงในรูปที่ 56(ข) และ 56(ค) ความรุนแรงในการพุ่งชนพื้นผิวลดลง ซึ่งความรุนแรงในการพุ่งชนพื้นผิวที่ลดลงสามารถสังเกตได้จากบริเวณที่มีสีเข้ม (ลำเจ็ทมีความเร็วสูง) บริเวณปากทางออกเจ็ทมีขนาดสั้นลง โดยความเร็วเจ็ทบริเวณใกล้พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไหลตัดที่อยู่ระหว่างเจ็ทแต่ละลำมีความเร็วสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหล สังเกตได้จากสีที่อยู่ระหว่างกระแสเจ็ทเข้มขึ้นเป็นลำดับดังแสดงในรูปที่ 56(ก), 56(ข) และ 56(ค) สำหรับ Contours และเวกเตอร์ของความเร็วดังแสดงในรูปที่ 56(ก), 56(ข) และ 56(ค) พบว่าทิศทางการไหลของเจ็ทหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้ย้อนกลับขึ้นสู่ผนังด้านบน โดยบางส่วนของเจ็ทที่ย้อนกลับขึ้นสู่ผนังด้านบนได้ไหลวนเข้าผสมกับการไหลของลำเจ็ท และบางส่วนได้ผสมกับกระแสไหลตัดทำให้กระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 56(ง) และ 56(จ)

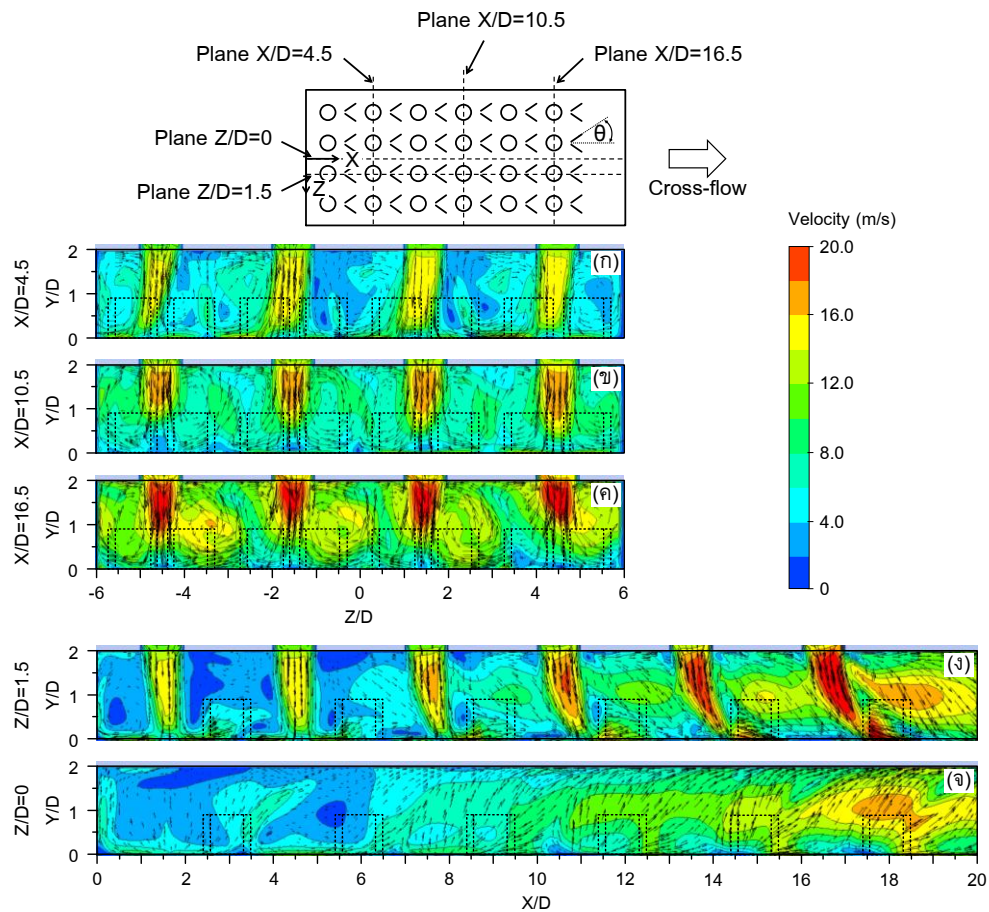


รูปที่ 56 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ กรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

รูปที่ 57, 58 และ 59 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ตามแนวแกน X และ Z ต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ตามลำดับ พบว่าลำเจ็ทที่อยู่บริเวณปลายทางการไหลจะได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 56(ง) โดยลำเจ็ทที่อยู่ในบริเวณปลายทางการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนสังเกตเห็นว่าลำเจ็ทมีความเร็วเพิ่มขึ้นและลำเจ็ทมีการโน้มเอียงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่ตำแหน่งเดียวกัน (ลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 3-6) เนื่องจากกระแสไหลตัดเมื่อไหลปะทะกับปีกสร้างกระแสหมุนวนจะเกิดการไหลแยกตัวจากปีกสร้างกระแสหมุนวนทำให้อิทธิพลของกระแสไหลตัดที่กระทำต่อลำเจ็ทบริเวณใกล้พื้นผิว การโน้มเอียงของลำเจ็ทจึงลดลง กระแสไหลตัดที่ไหลแยกตัวจากปีกสร้างกระแสหมุนวนจะไหลเข้าผสมกับลำเจ็ทส่งผลให้ความเร็วในลำเจ็ทเพิ่มขึ้น การพุ่งชนพื้นผิวของลำเจ็ทจึงเกิดขึ้นอย่างรุนแรง

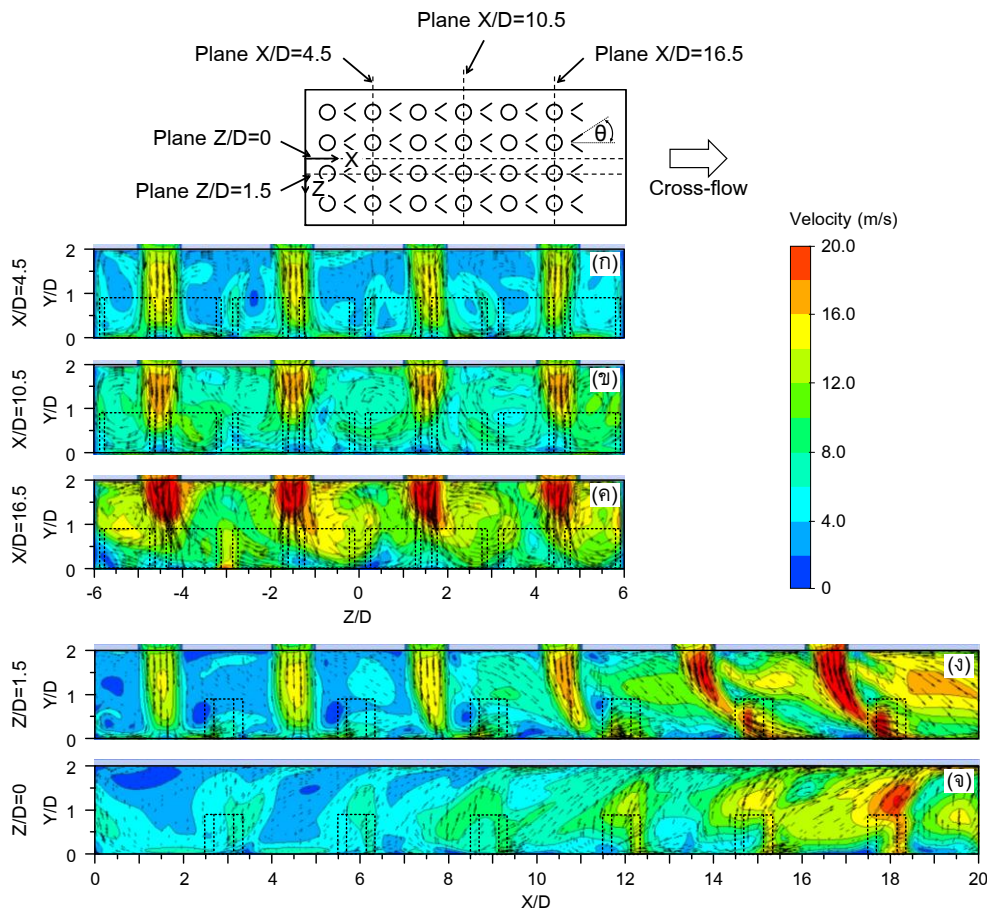


รูปที่ 57 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)



รูปที่ 58 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$ (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

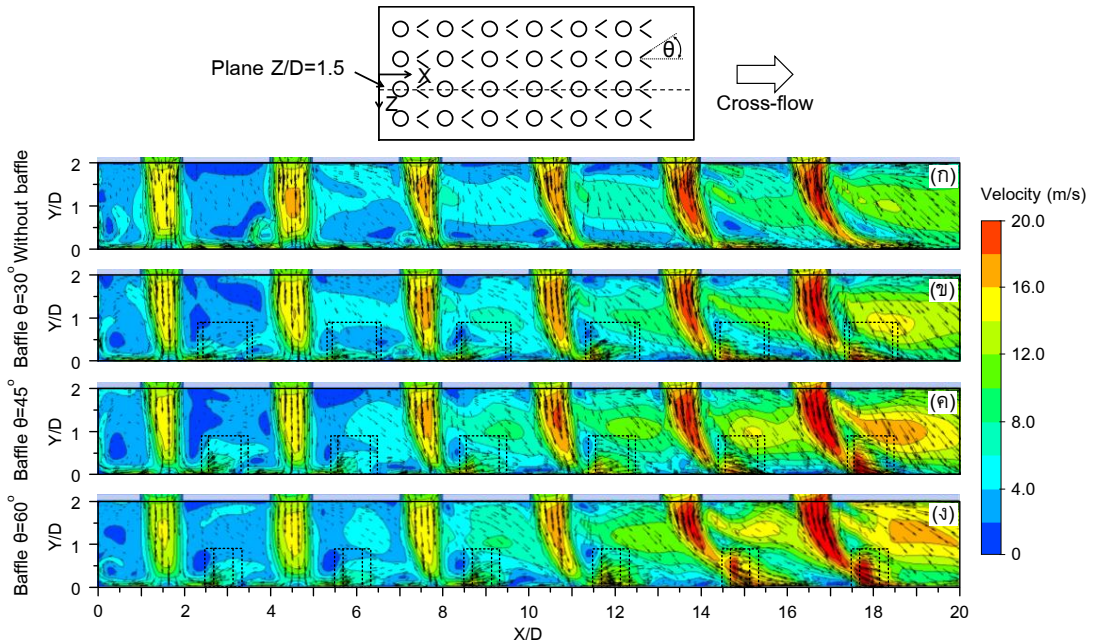
สำหรับเจ็ทที่อยู่บริเวณต้นทางการไหล ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวอย่างรุนแรง เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ สำหรับลำเจ็ทที่อยู่ห่างออกจากบริเวณต้นทางการไหล ความรุนแรงในการพุ่งชนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน ซึ่งความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการหมุนวนของกระแสไหลตัดหลังจากที่ไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวนแล้วไหลเข้าผสมกับลำเจ็ท สังเกตได้จากขนาดของเวกเตอร์ของความเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสไหลตัดที่อยู่ระหว่างลำเจ็ทแต่ละลำมีความเร็วสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากต้นทางการไหลสู่ปลายทางการไหล สังเกตได้จากสีที่อยู่ระหว่างกระแสเจ็ทเข้มขึ้นเป็นลำดับ สำหรับ Contour และเวกเตอร์ของความเร็ว พบว่าทิศทางการไหลของเจ็ทหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้ไหลย้อนกลับขึ้นสู่พื้นผิวด้านบน โดยบางส่วนของเจ็ทที่ไหลย้อนกลับขึ้นสู่พื้นผิวด้านบนได้ไหลวนเข้าผสมกับการไหลของลำเจ็ท และบางส่วนได้ไหลเข้าผสมกับกระแสไหลตัดทำให้กระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น



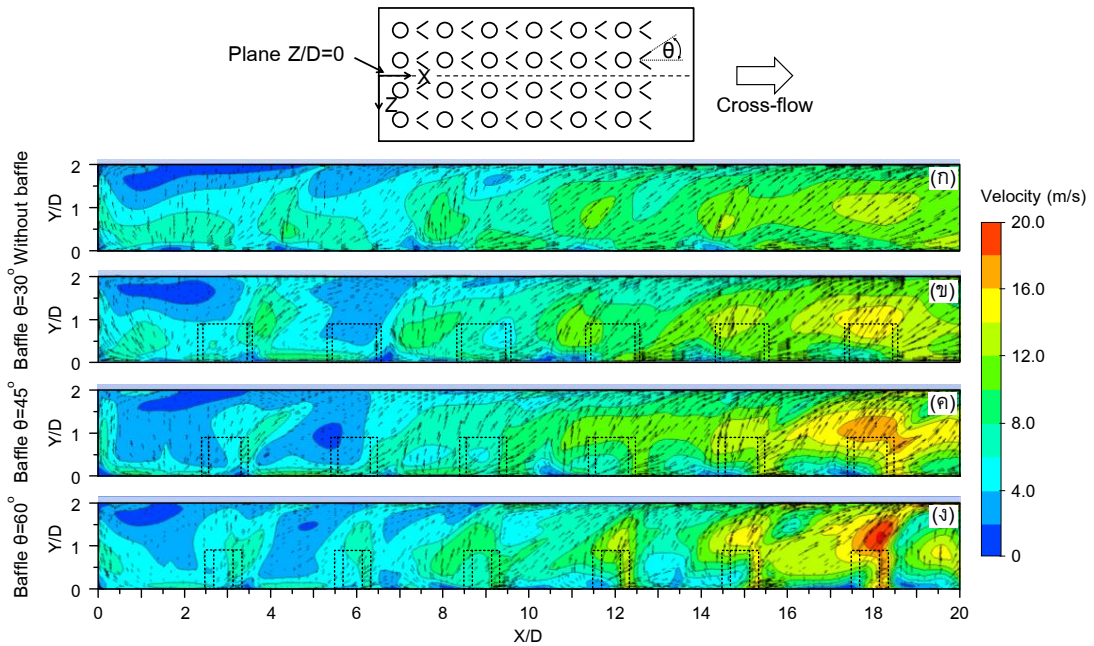
รูปที่ 59 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบต่างๆ กรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=60^\circ$ (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

รูปที่ 60 และ 61 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contours และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$ และ 0 ตามลำดับ พบว่ากรณีพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 60(ก) เมื่อลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการหมุนวนของเจ็ทผนังในบริเวณต้นทางการไหลของเจ็ทแต่ละลำ และการหมุนวนบริเวณต้นทางการไหลจะมีขนาดเล็กลงเมื่อลำเจ็ทอยู่ในตำแหน่งที่ห่างออกไป ในบริเวณปลายทางการไหลของลำเจ็ท พบว่าเจ็ทผนังที่เกิดขึ้นมีการไหลเรียบไปกับพื้นผิว เมื่อพิจารณากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 60(ข), 60(ค) และ 60(ง) พบว่าการหมุนวนของเจ็ทผนังในบริเวณต้นทางการไหลของเจ็ทแต่ลำจะหายไป แต่ยังคงมีการหมุนวนของเจ็ทผนังบริเวณต้นทางการไหลของเจ็ทในแถวแรกเท่านั้น เจ็ทผนังที่เกิดขึ้นบริเวณต้นทางการไหลกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนจะไหลเรียบไปกับพื้นผิว ส่วนบริเวณปลายทางการไหลพบว่าเจ็ทผนังที่เกิดขึ้นจะไหลเรียบไปกับพื้นผิวในช่วงแรกและเมื่อเจ็ทผนังไหลปะทะกับปีกสร้างกระแสหมุนวนทำให้บริเวณด้านหน้าของปีกสร้างกระแสหมุนวนมีความเร็วเพิ่มขึ้น สังเกตเจ็ทบริเวณปลายทางการไหล (ลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 5 และ 6)

ดังแสดงในรูปที่ 60 (ข), 60(ค) และ 60(ง) ลำเจ็ทมีการไหลปะทะบริเวณด้านหน้าของปีกสร้างกระแสหมุนวนก่อนพุ่งชนพื้นผิว ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความเร็วของกระแสไหลตัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 60 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ Z/D=1.5 (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

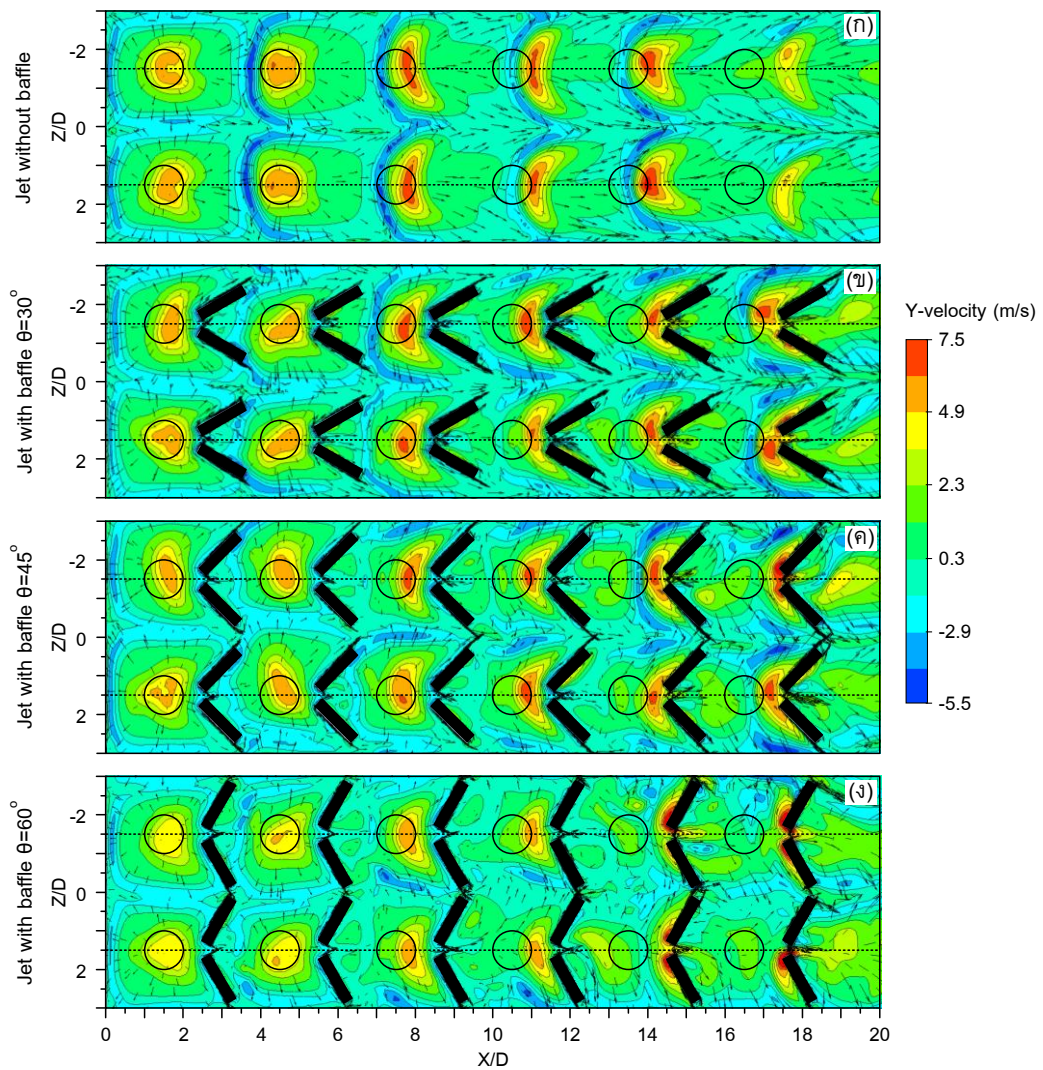


รูปที่ 61 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ Z/D=0 (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

รูปที่ 62 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของกลุ่มเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวแบบ Contours และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน 1.5 mm พบว่าค่าความเร็วที่เป็นบวกแสดงถึงทิศทางของความเร็วเจ็ทที่พุ่งลงกระทบพื้นผิว และค่าที่เป็นลบแสดงถึงทิศทางของความเร็วพุ่งขึ้นมาจากพื้นผิว ซึ่งเกิดจากการปะทะระหว่างเจ็ทผนัง (Wall jet) ของเจ็ทแต่ละลำแล้วไหลขึ้นจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน นอกจากนี้ในรูปยังแสดงเวกเตอร์เพื่อแสดงทิศทางของการไหลบนระนาบ X-Z สำหรับบริเวณที่มีความเร็วในแนวแกน Y สูงสุดหมายถึงบริเวณที่เป็นจุดศูนย์กลางที่เจ็ทกระทบพื้นผิว (Stagnation point)

สำหรับกรณีพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 62(ก) พบว่าเจ็ทที่อยู่ห่างจากบริเวณต้นทางการไหลยิ่งมาก ทำให้จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเลื่อนไปบริเวณปลายทางการไหลมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะจากบริเวณต้นทางการไหลสู่บริเวณปลายทางการไหล สำหรับการเลื่อนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น สอดคล้องกับความเร็วของกระแสไหลตัดที่เพิ่มขึ้นบริเวณปลายทางการไหล สำหรับลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 3-6 มีลักษณะเป็นรูปเกือกม้า เนื่องจากได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดมากกว่าลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 1 และ 2 สังเกตว่าเกิดเจ็ทผนังบริเวณต้นทางการไหลของเจ็ทแต่ละลำและเจ็ทผนังจะหายไปเมื่อตำแหน่งห่างออกไปจากต้นทางการไหล

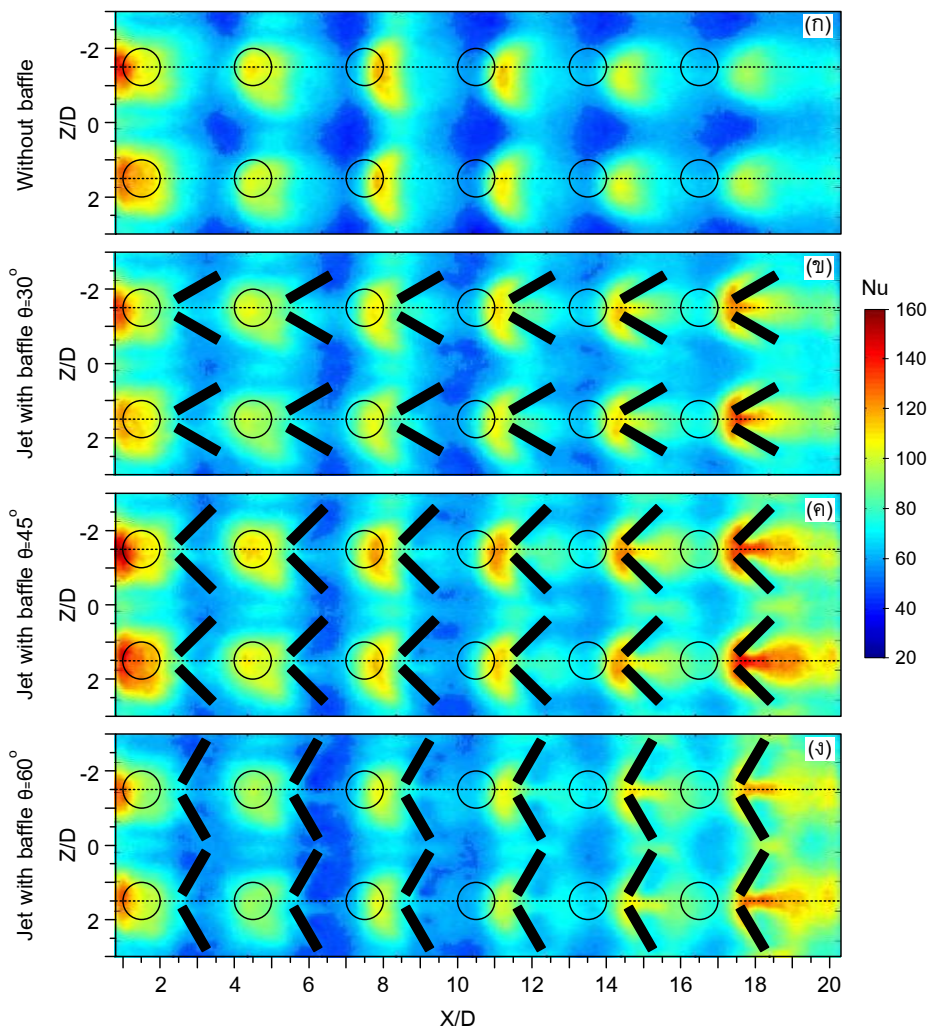
สำหรับกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 62(ข), 62(ค) และ 62(ง) พบว่าลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 1 และ 2 ยังคงมีโครงสร้างการไหลที่คล้ายกับโครงสร้างการไหลกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 62(ก) สังเกตเห็นว่าบริเวณที่ลำเจ็ทพุ่งชนจะมีสีที่เข้มและมีตำแหน่งตรงกับบริเวณปากทางออกของออร์ริฟิส นอกจากนี้ยังพบว่าเจ็ทผนังที่เกิดขึ้นในบริเวณต้นทางการไหลของลำเจ็ทจะหายไป เมื่อพิจารณาผลของมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวน พบว่ามีการกระจายของความเร็วในทิศทางแกน Z มากขึ้นเมื่อมุมปะทะมีขนาดใหญ่ ความเร็วของกระแสไหลตัดบริเวณปลายทางการไหลจะมีค่าสูงกว่าความเร็วของกระแสไหลตัดบริเวณต้นทางการไหล



รูปที่ 62 ผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ที่สูงจากพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน 1.5 mm (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

5.3.2 ผลการทดลองลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

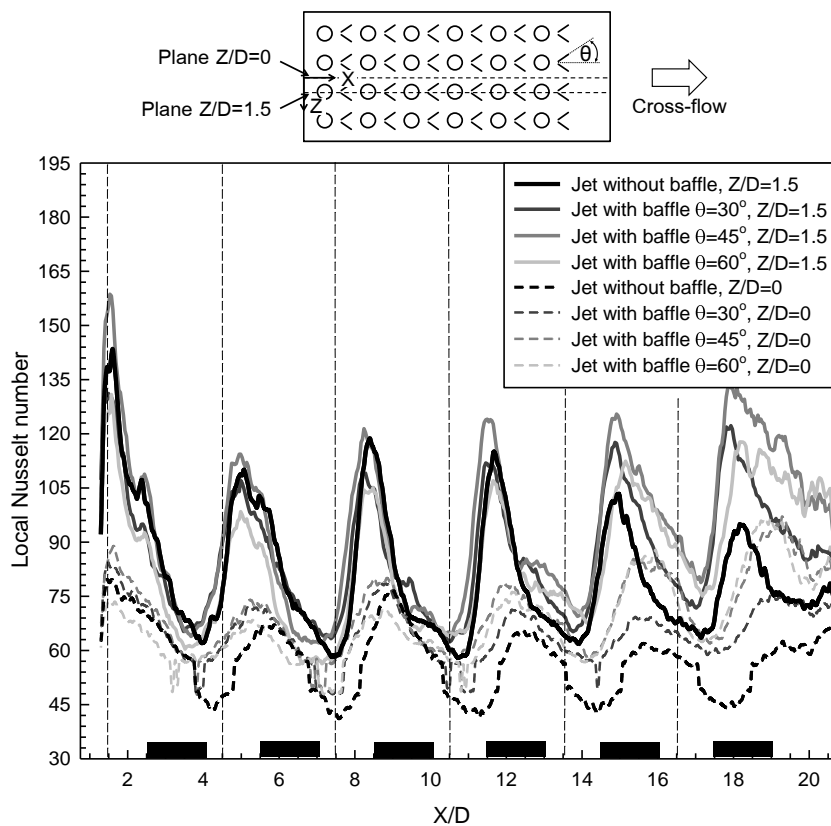
รูปที่ 63 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนพบว่าลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์สอดคล้องกับลักษณะการกระจายความเร็วในแนวแกน Y ที่ได้จากการศึกษาการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contours และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ Z-X ดังแสดงในรูปที่ 62 บริเวณที่ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงเป็นบริเวณที่ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง และบริเวณที่ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำเป็นบริเวณที่เกิดการผสมของเจ็ทผนังและรวมตัวกันเป็นกระแสไหล สังเกตว่าบริเวณปลายทางการไหล (ลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 5-6) การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนจะให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการไหลปะทะของลำเจ็ทกับบริเวณด้านหน้าของปีกสร้างกระแสหมุนวน



รูปที่ 63 ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน
(เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

สำหรับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนดังแสดงในรูปที่ 61(ก) พบว่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงบริเวณที่ลำเจ็ทพุ่งชนและมีค่าต่ำในบริเวณที่ลำเจ็ทไม่พุ่งชนโดยตรง สำหรับบริเวณต้นทางการไหล (ลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 1-3) บริเวณที่ให้ นัสเซิลต์นัมเบอร์สูง ($Nu > 140$) เกิดขึ้นตรงกับตำแหน่งของรูหัวฉีดแต่ละรู แต่สำหรับบริเวณปลายทางการไหล (ลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 4-6) บริเวณที่ให้ นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงเลื่อนไปยังบริเวณปลายทางการไหล ซึ่งเกิดจากผลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูงบริเวณปลายทางการไหลและไหลตัดผ่านลำเจ็ทที่กำลังพุ่งชนพื้นผิว

สำหรับกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนดังแสดงในรูปที่ 63(ข), 63(ค) และ 63(ง) พบว่าบริเวณต้นทางการไหลการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์ที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน เมื่อพิจารณาบริเวณปลายทางการไหล พบว่ากรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนให้นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงขึ้น เนื่องจากการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้ลำเจ็ทบริเวณปลายทางการไหลมีการไหลปะทะกับบริเวณด้านหน้าของปีกสร้างกระแสหมุนวนสอดคล้องกับผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ที่ระยะ $Z/D=1.5$ ดังแสดงในรูปที่ 60



รูปที่ 64 ลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

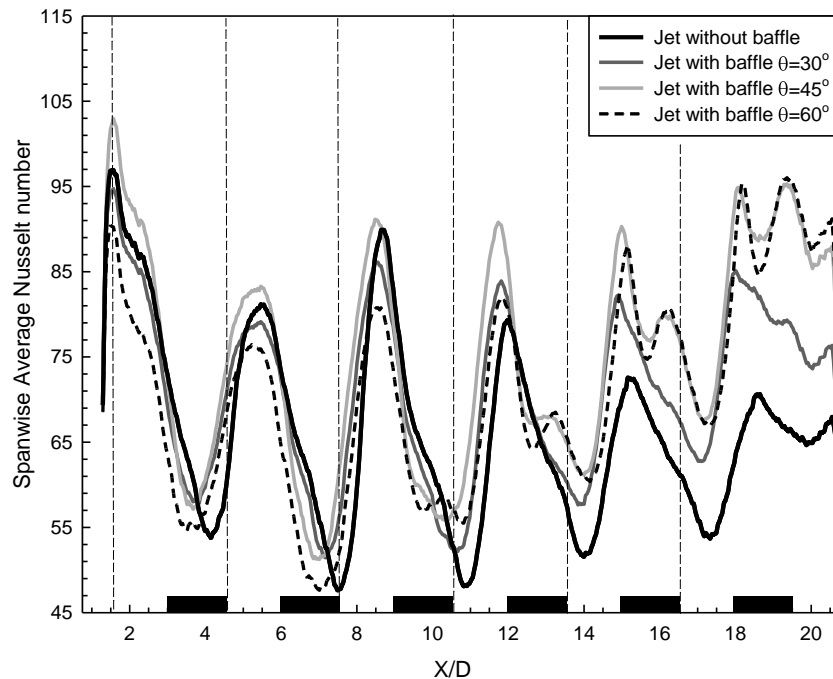
รูปที่ 64 แสดงลักษณะการกระจายของน้สเซลล์ล์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน โดยภาพรวมพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระหมุ่นบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนให้การกระจายของน้สเซลล์ล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าบริเวณปลายทางการไหลมีการกระจายของน้สเซลล์ล์นัมเบอร์สูงกว่าบริเวณต้นทางการไหล เนื่องจากผลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูงไหลปะทะกับปีกสร้างกระหมุ่นส่งผลให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรง

เมื่อพิจารณาที่ระยะ $Z/D=1.5$ พบว่ากรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระหมุ่น การกระจายของของน้สเซลล์ล์นัมเบอร์จะสูงบริเวณต้นทางการไหล และการกระจายของน้สเซลล์ล์นัมเบอร์จะต่ำลงเมื่อระยะ X/D เพิ่มขึ้น สังเกตเห็นว่าค่าน้สเซลล์ล์นัมเบอร์ที่สูงมีการเลื่อนตำแหน่งไปยังบริเวณปลายทางการไหล เนื่องจากลำเจ็ทได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณต้นทางการไหล (ลำเจ็ทคอลล์มันท์ที่ 1) บริเวณที่ให้น้สเซลล์ล์นัมเบอร์ที่มีค่าสูงมีการเลื่อนตำแหน่งไปยังผนังจำกัดการไหล เนื่องจากลำเจ็ทมีการพุ่งชนพื้นผิวส่งผลให้เกิดเจ็ทผนังในทุกทิศทาง เจ็ทผนังที่เกิดขึ้นไหลเรียบไปกับพื้นผิวบริเวณต้นทางการไหล และไหลปะทะกับผนังจำกัดการไหลทำให้ค่าน้สเซลล์ล์นัมเบอร์ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ $X-Y$ ที่ระยะ $Z/D=1.5$ ดังแสดงในรูปที่ 60

เมื่อพิจารณาที่ระยะ $Z/D=0$ พบว่าการกระจายของน้สเซลล์ล์นัมเบอร์จะต่ำบริเวณต้นทางการไหล และการกระจายของน้สเซลล์ล์นัมเบอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะ X/D เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามุมปะทะขนาดใหญ่ให้ค่าน้สเซลล์ล์นัมเบอร์สูงกว่ามุมปะทะขนาดเล็ก เนื่องจากมุมปะทะขนาดใหญ่ส่งผลให้กระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกสร้างกระหมุ่นมีความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรงซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ $X-Y$ ที่ระยะ $Z/D=1.5$ ดังแสดงในรูปที่ 61

6.3.3 นัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน

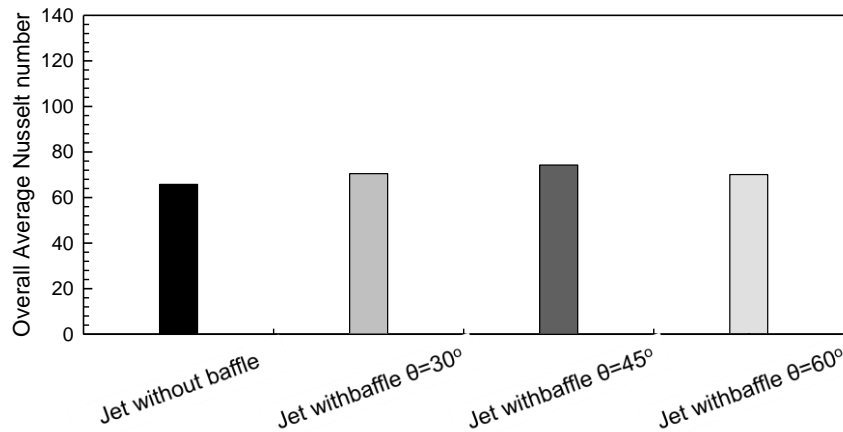
รูปที่ 65 แสดงนัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน โดยภาพรวมพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนให้นัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะบริเวณปลายทางการไหลจะให้นัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลสูงกว่ากรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สังเกตเห็นว่าบริเวณปลายทางการไหล (ลำเจ็ทคอลัมน์ที่ 4-6) เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับสอง (Secondary peak) ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองลักษณะการไหลแบบ Contour และเวกเตอร์ของความเร็วในระนาบ X-Y ดังแสดงในรูปที่ 60 สำหรับกรณีพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน พบว่าค่านัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลมีค่าสูงบริเวณต้นทางการไหลและจะมีค่าลดลงเมื่อระยะ X/D เพิ่มขึ้น



รูปที่ 65 นัสเซลล์ต์นัมเบอร์เฉลี่ยในแนวขวางการไหลที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน
(เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

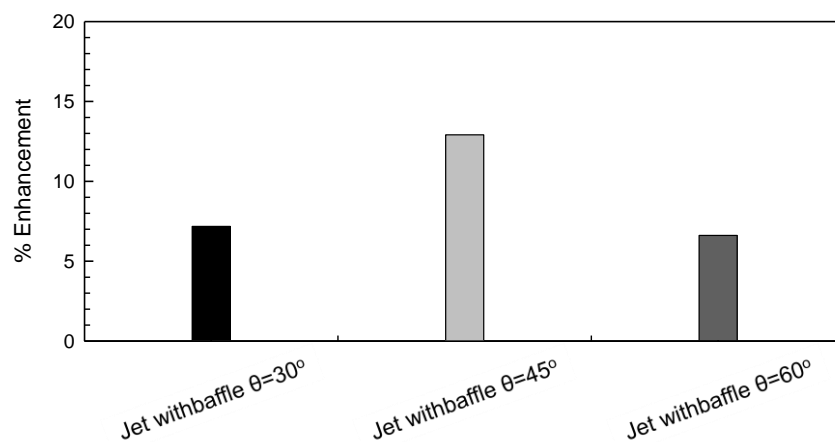
6.3.4 การเปรียบเทียบนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 66 แสดงนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน โดยภาพรวมพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน นอกจากนี้ยังพบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$ ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด รองลงมาเป็นการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$ และ 60° โดยผลต่างของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวของมุมปะทะทั้งสองแตกต่างกันไม่มาก สำหรับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวต่ำสุด



รูปที่ 66 นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชน (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

รูปที่ 67 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเปรียบเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนสามารถให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 7.17%, 12.91% และ 6.61% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน



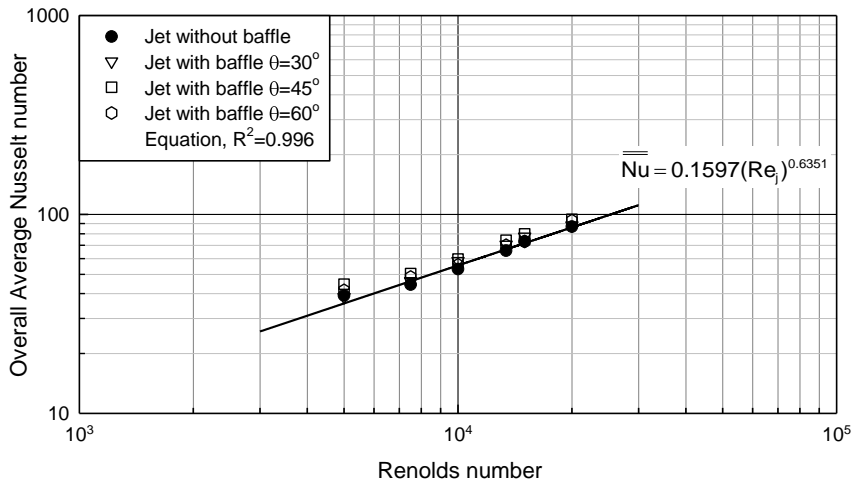
รูปที่ 67 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทพุ่งชนเปรียบเทียบกับกรณีกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน (เจ็ทอากาศ, $Re_j=13,400$)

6.3.5 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนสำหรับกลุ่มเจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว (\overline{Nu}) และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ท (Re_j) ที่ได้จากการศึกษา สำหรับการไหลในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ $5,000 \leq Re_j \leq 20,000$ จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\overline{Nu} = 0.1597(Re_j)^{0.6351} \quad (26)$$

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (26) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้วจะได้ดังแสดงในรูปที่ 66 โดยภาพรวมพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง



รูปที่ 68 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนสำหรับกลุ่มเจ็ทพุ่งชน (เจ็ทอากาศ, $5,000 \leq Re_j \leq 20,000$)

ตารางที่ 5 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวในช่วง $-0.5 \leq X/D \leq 20$ และ $-3 \leq Z/D \leq 3$ และเรย์โนลด์นัมเบอร์ของกลุ่มเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวที่ได้จากการทดลอง สำหรับการไหลในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ $5,000 \leq Re_j \leq 20,000$ เมื่อพิจารณาผลของการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะต่างๆ

ตารางที่ 5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน

มุมปะทะ (θ)	สมการความสัมพันธ์	R^2
Jet without baffle	$\overline{Nu} = 0.2223(Re_j)^{0.5998}$	0.995
Jet with baffle $\theta=30^\circ$	$\overline{Nu} = 0.1782(Re_j)^{0.6283}$	0.996
Jet with baffle $\theta=45^\circ$	$\overline{Nu} = 0.3407(Re_j)^{0.5659}$	0.994
Jet with baffle $\theta=60^\circ$	$\overline{Nu} = 0.2767(Re_j)^{0.5823}$	0.995

7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการติดตั้งปีกตัวสร้างกระแสหมุนวน และศึกษาผลของมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวน $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับพื้นผิวที่ไม่ติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวใช้แผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล และหาการกระจายของน้ำเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลบนพื้นผิวโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ จากผลการศึกษารูปได้ดังนี้

7.1.1 การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

(1) การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่ากระแสไหลตัดเกิดการไหลแยกตัวบริเวณปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้กระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวนมีความเร็วเพิ่มขึ้น กระแสไหลตัดที่ไหลผ่านปีกสร้างกระแสหมุนวนจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวนเพิ่มขึ้น

(2) การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าเกิดการหมุนวนในลักษณะที่หมุนเข้าหากันบริเวณคู่ของปีกสร้างกระแสหมุนวน การหมุนวนที่เกิดขึ้นจะดึงกระแสไหลตัดที่มีความเร็วเข้ามาปะทะกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้เกิดการไหลปะทะอย่างรุนแรงทำให้ชั้นขอบเขตการไหลบริเวณนี้มีความหนาลดลง จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้เพิ่มขึ้น

(3) อัตราการถ่ายเทความร้อนกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถให้น้ำเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($V_c=5$ m/s) ให้น้ำเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 58.39%, 64.10% และ 53.10% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน

7.1.2 การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน

(1) การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแฉวพุ่งชน พบว่าสำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วต่ำ ($VR=7$) ปีกสร้างกระแสหมุนวนจะขวางการไหลของกระแสไหลตัดในบริเวณต้นทางการไหลส่งผลให้ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนรุนแรงขึ้น สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) ปีกสร้างกระแสหมุนวนจะช่วยผสมกระแสไหลตัดและลำเจ็ทส่งผลให้ลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนรุนแรงขึ้น

(2) การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแกวฟุ้งชนไม่สามารถลดอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีผลต่อลักษณะการไหลของเจ็ท แต่การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนสามารถเพิ่มการผสมของกระแสไหลตัดและลำเจ็ท นอกจากนี้ยังพบว่าการไหลของลำเจ็ทเกิดการโน้มเอียงไปยังบริเวณปลายทางการไหลของกระแสไหลตัดมากขึ้นเมื่อกระแสไหลตัดมีความเร็วเพิ่มขึ้น (VR ลดลง)

(3) อัตราการถ่ายเทความร้อนกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่เจ็ทแกวฟุ้งชนสามารถให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ($VR=3$) ให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงสุด พบว่าการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 28.58%, 32.49% และ 35.73% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน

7.1.3 การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทฟุ้งชน

(1) ความเร็วของกระแสไหลตัดบริเวณปลายทางการไหลมีค่าสูงกว่าบริเวณต้นทางการไหล ดังนั้นเจ็ทที่อยู่บริเวณปลายทางการไหลจะได้รับผลกระทบของกระแสไหลตัดมากกว่าบริเวณต้นทางการไหล ส่งผลทำให้บริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนและบริเวณที่ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงเลื่อนไปยังปลายทางการไหลของกระแสไหลตัด นอกจากนี้ยังพบว่าเจ็ทในบริเวณปลายทางการไหลมีการไหลปะทะบริเวณด้านหน้าของปีกสร้างกระแสหมุนวนส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

(2) การติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทฟุ้งชนไม่สามารถลดอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีผลต่อลักษณะการไหลของเจ็ท แต่จะไปช่วยเพิ่มการผสมของกระแสไหลตัดและลำเจ็ท นอกจากนี้ยังพบว่าเจ็ทที่อยู่บริเวณปลายทางการไหลจะได้รับผลกระทบของกระแสไหลตัดที่มีความเร็วสูง ส่งผลให้ลำเจ็ทเกิดการโน้มเอียงไปยังปลายทางการไหลของกระแสไหลตัด

(3) อัตราการถ่ายเทความร้อนกรณีติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนบนพื้นผิวที่กลุ่มเจ็ทฟุ้งชนสามารถให้นัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน สำหรับการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวสูงกว่า 7.17%, 12.91% และ 6.61% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการติดตั้งปีกสร้างกระแสหมุนวน

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยได้ศึกษาผลของมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวในเบื้องต้น ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงและเพิ่มเติมขอบเขตในการทำวิจัยดังนี้

(1) ศึกษาผลของความสูงของปีกสร้างกระแสหมุนวนให้ละเอียดขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความสูงของปีกสร้างกระแสหมุนวนที่ความสูง $e/D=0.9$ ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าที่ความสูง e/D ไตที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

(2) ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ท (S) และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) ที่ระยะต่างๆ เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างลำเจ็ทและระยะพุ่งชนอาจมีส่วนช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

(3) ศึกษาผลของมุมปะทะของปีกสร้างกระแสหมุนวนให้ละเอียดขึ้น เนื่องจากผลของมุมปะทะอาจมีส่วนช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น

(4) ศึกษาผลของความดันตก (Pressure drop) และการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน (Friction loss) ที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่ม

(5) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบการให้ความร้อน ระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เช่น เครื่องอุณหอากาศพลังงานแสงอาทิตย์

บรรณานุกรม

- [1] Chu, P., He, Y.L., Lei, Y.G., Tian, L.T., and Li, R., **(2009)**, “Three-dimensional numerical study on fin-and-oval-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 5-6, pp. 859–876.
- [2] Aris, M.S., McGlen, R., Owen, I., and Sutcliffe, C.J., **(2011)**, “An experimental investigation into the deployment of 3-D, finned wing and shape memory alloy vortex generators in a forced air convection heat pipe fin stack”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 14-15, pp. 2230–2240.
- [3] Viskanta, R., **(1993)**, “Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 111-134.
- [4] Baughn, J.W., and Shimizu, S., **(1989)**, “Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet”, *Journal Heat Transfer*, Vol. 111, No. 4, pp. 1096–1098.
- [5] Kataoka, K., **(1990)**, “Impingement heat transfer augmentation due to large scale eddies”, *International Heat Transfer Conference* , Vol. 1, pp. 255–273.
- [6] Gardon, R., and Cahit Akfirat, J., **(1965)**, “The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of Impinging jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 8, No. 10, pp. 1261-1272.
- [7] 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.
- [8] Esposito, E.I., “Jet impingement cooling configurations for gas turbine combustion”, *Thesis of Master in Mechanical Engineering, Louisiana State University*, **2006**.
- [9] 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
- [10] Bouchez, J.P., and Goldstein, R.J., **(1975)**, “Impingement cooling from a circular jet in a crossflow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, No. 6, pp. 719-730.

- [11] Wang, L., Sunden, B., Borg, A., and Abrahamsson, H., (2011), "Control of jet impingement heat transfer in crossflow by using a rib", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 19-20, pp. 4157-4166.
- [12] Wae-hayee, M., Tekasakul, P., and Nuntadusit, C., (2013), "Influence of Nozzle Arrangement on Flow and Heat Transfer Characteristics of Arrays of Circular Impinging Jets", *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 35, No. 2, pp. 203–212.
- [13] Taslim, M.E., Li, T., and Kercher, D.M., (1996), "Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, v-shaped and discrete ribs on two opposite walls", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, No. 1, pp. 20-28.
- [14] Biswas, G., Torii, K., Fujii, D., and Nishino, K., (1996), "Numerical and experimental determination of flow structure and heat transfer effects of longitudinal vortices in a channel flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 16, pp. 3441-3451.
- [15] Saha, P., Biswas, G., and Sarkar, S., (2014), "Comparison of winglet-type vortex generators periodically deployed in a plate-fin heat exchanger – A synergy based analysis", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 74, pp. 292–305.
- [16] "Jet Arrays Turbulence and Heat transfer Characteristics", Online, Available: http://mime.oregonstate.edu/research/fluidlab/FL_Res_JetImp.html, Accessed: December 19, 2014.
- [17] "Light on the Earth: Online Solar Manual for Homeowners", Online, Available: <http://lightontheearth.blogspot.com/p/homeowners-solar-manual-online.html>, Accessed: December 18, 2014.
- [18] Kline, S.J., and McClintock, F.A., (1953), "Describing uncertainties in single sample experiments", *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
- [19] Lee, J. and Lee, S.J., (2000), "The effect of nozzle configuration on stagnation region heat transfer enhancement of axisymmetric jet impingement", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3497-3509.
- [20] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S., (2007), "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.
- [21] Menter, F.R., J. Carregal Ferreira, Esch, T.M., and Konno, B., (2003), "The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas

- [22] "Law of the wall", Online, Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall, Accessed: July 27, 2014
- [23] 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, Mar 18-20.
- [24] Zuckerman, N., and Lior, N., **(2006)**, "Jet impingement heat transfer: physics, correlations, Numerical modeling", Advances in Heat Transfer, Vol. 39, pp. 565-631.
- [25] Heo, M.W., Lee, K. D., and Kim, K.Y., **(2011)**, "Optimization of an inclined elliptic impinging jet with cross flow for enhancing heat transfer", Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp.731-742.
- [26] Inc. ANSYS, ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, Vol. 12. Canonsburg, Pennsylvania, United States, **2009**.

ภาคผนวก ก.

บทความสำหรับเผยแพร่ 1

“การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนร่วมกับ
ตัวสร้างกระแสหมุนวน”

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10



การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนร่วมกับตัวสร้าง
กระแสมนวน

**Heat Transfer Enhancement on an Impinged Surface of an Array of Jet Impingements by
Mounting Baffles**

รัตนกรรณ์ ปานสังข์, มัถดาร์ แวหะยี, ภาสกร เวสสะ โกศล และ ชยุต นันทฤติ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคลองหอยโข่ง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

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

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนโดยการติดตั้งตัวสร้างกระแสมนวนแบบปีกในการทดลอง เจ็ทอากาศถูกปล่อยผ่านกลุ่มของออริฟิสพุ่งชนพื้นผิวด้านตรงข้าม โดยที่กำหนดให้ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D$ และระยะระหว่างเจ็ท $S=3D$ (เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจ็ท) และในแต่ละการทดลองให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทแต่ละรูคงที่ $Re=13,400$ และศึกษาผลของรูปแบบคู่ของปีกที่มีการติดตั้งด้วยมุมปะทะ $\theta=30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ติดบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน การกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิววัดโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิกควิดคริสตัลและการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์คำนวณโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ จากผลการทดลองพบว่ากรณีติดตั้งตัวสร้างกระแสมนวนแบบปีกให้ผลการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งตัวสร้างกระแสมนวน

คำหลัก: เจ็ทกลุ่มพุ่งชน, การเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน, แผ่นกั้น

Abstract

The aim of this research is to enhance the heat transfer on a target surface of an array of impinging jets by mounting baffles. Air jet was discharged through arrays of orifices and perpendicularly impinged on an opposite surface in confined channel. The jet-to-plate distance $H=2D$ and the jet-to-jet distance $S=3D$ (when D is the jet diameter). The experiments were carried out under jet Reynolds number of 13,400. A couples of baffles with V-shaped arrangement at attack angle $\theta=30^\circ, 45^\circ$ and 60° , were mounted on surface of impinging jets. Temperature distributions on the impingement surface were measured using Thermochromic Liquid Crystal sheet (TLCs) and Nusselt number distribution was evaluated by using image processing technique. The results show that the heat transfer on the impingement surface for the case of mounting the baffles with V-shaped is higher than those without mounting the baffles.



Keywords: Array of impinging jet, Heat transfer enhancement, Baffles

1. บทนำ

เจ็ทพุ่งชน (Jet impingement) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผนังห้องเผาไหม้ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง และเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อย่างไรก็ตาม การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสูงเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเท่านั้น แต่บริเวณรอบๆ การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ [1-2] จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่จะใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนแทนเจ็ทลำเดียว สำหรับกรณีเจ็ทกลุ่มโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนผนังจะมีความซับซ้อน เนื่องจากก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการผสมระหว่างเจ็ทที่อยู่ติดกัน และหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการชนกันของเจ็ทผนังที่อยู่ติดกัน นอกจากนี้เจ็ทที่พุ่งชนผนังแล้วจะรวมตัวกันเปลี่ยนเป็นการไหลภายในช่องระหว่างแผ่นเจ็ทกับผนังที่เจ็ทพุ่งชน เกิดเป็นกระแสไหลตัดกับเจ็ทที่อยู่ใกล้ทางออกของการไหล จากการศึกษาพบว่ากระแสไหลตัดจะทำให้การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวลดลง เป็นสาเหตุทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ เป็นข้อจำกัดของการใช้เจ็ทกลุ่มพุ่งชนเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

งานวิจัยที่ผ่านมา ชยุด และคณะ [3] ได้ออกแบบปากทางออกเจ็ทเป็นแบบวงกลมยาว (Elongated round Orifice) เพื่อลดอิทธิพลของกระแสไหลตัด จากการทดลองพบว่า การออกแบบปากทางออกเจ็ทแบบวงกลมยาวโดยอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว $AR=4$ และ 8 สามารถเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้

สูงกว่าเจ็ทแบบวงกลม ($AR=1$) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณานัสเชิลต์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิวพบว่า เจ็ทกรณี $AR=4$ และ 8 สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนบริเวณระหว่างแถวของเจ็ทยังคงมีค่านัสเชิลต์นัมเบอร์ต่ำเมื่อเทียบกับบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง

Esposito [4] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทกลุ่มพุ่งชน โดยออกแบบชุดทดลองเพื่อลดผลกระทบจากกระแสไหลตัดเพื่อเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ชุดทดลองที่ออกแบบมี 3 ลักษณะ (1) แบบหัวฉีดยื่นออกจากผนังเจ็ท (2) แบบหัวฉีดท่อยาวคงที่ และ (3) แบบหัวฉีดท่อยาวไม่คงที่ นอกจากนี้ได้ออกแบบชุดทดลองแบบออร์ฟิสเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง จากการทดลองพบว่าชุดทดลองแบบหัวฉีดท่อยาวไม่คงที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงกว่าแบบอื่นๆ

Biswas และคณะ [5] ได้ศึกษากรณีการติดปีกรูปสามเหลี่ยมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ในการศึกษาได้พิจารณาผลของมุมปะทะระหว่างปีกรูปสามเหลี่ยมกับการไหลหลักที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและการสูญเสียความดันผ่านปีกรูปสามเหลี่ยม พบว่ามุมปะทะที่เพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น มุมปะทะที่กว้างมีผลทำให้เกิดเกิดกระแสหมุนวนตามแนวยาวที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบพบว่ามุมปะทะที่สูงขึ้นทำให้ความดันสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น

Tian และคณะ [6] ได้ศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ติดปีก 4 ลักษณะ โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขดังนี้ (1) ปีกสี่เหลี่ยมที่มุมปะทะเข้าหากัน (2) ปีกสี่เหลี่ยมที่มุมปะทะออกจากกัน (3) ปีกสามเหลี่ยมที่มุมปะทะเข้าหากัน และ (4) ปีกสามเหลี่ยมที่มุมปะทะออกจากกัน จากการทดลองพบว่าปีกสี่เหลี่ยมที่มุม

ปะทะเข้าหากันให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์นำเบอร์เฉลี่ยสูงสุด

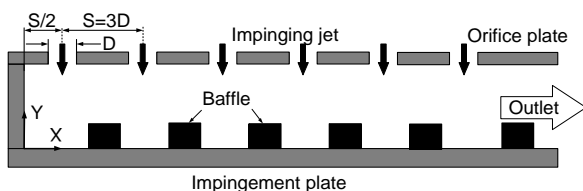
ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทกลุ่มพุ่งชนร่วมกับการติดตั้งตัวสร้างกระแสหมุนวนแบบปีกเพื่อลดปัญหาความไม่สม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว และศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ตัวสร้างกระแสหมุนวนลดอิทธิพลของกระแสไหลตัดที่มีต่อการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว

2. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

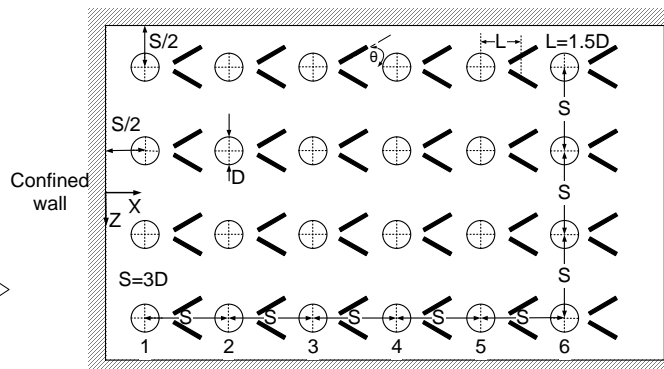
2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 1(a) แสดงโมเดลการทดลอง อากาศถูกปล่อยจากกลุ่มของออริฟิสพุ่งชนพื้นผิวด้านตรงข้ามในท่อจำกัดการไหล กระแสไหลตัดเกิดจากการสะสมของเจ็ทต้นทางจนไหลออกอีกด้านของท่อ ความเร็วของกระแส

ไหลตัดจะเพิ่มขึ้นและเจ็ทในแถวสุดท้ายไหลทางออกมีผลของกระแสไหลตัดที่รุนแรง ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2D$ ในการทดลองจะใช้เจ็ทขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 13.2 mm ตัวสร้างกระแสหมุนวนแบบปีกทำจากแผ่นอะคริลิกขนาดหนา 3 mm สูง 7.92 mm และยาว 10 mm ทดลองที่มุมปะทะของตัวสร้างกระแสหมุนวนแบบปีก $\theta=30^\circ, 45^\circ$ และ 60° โดยติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านหน้าของเจ็ทแต่ละแถวที่ระยะ $L=1.5D$ รูปที่ 1(b) แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ท เจ็ทกลุ่มจำนวน 24 ท่อ เรียงกัน 4 แถว แถวละ 6 ท่อ และระยะห่างระหว่างท่อเจ็ท $S=3D$ กำหนดให้ค่าเรย์โนลด์ของเจ็ททุกการทดลองคงที่ $Re=13,400$ (ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อเจ็ทและความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ทในการคำนวณ) ระยะห่างระหว่างผนังจำกัดการไหลถึงท่อเจ็ท $S/2 (=1.5D)$



(a) แสดงโมเดลการทดลอง



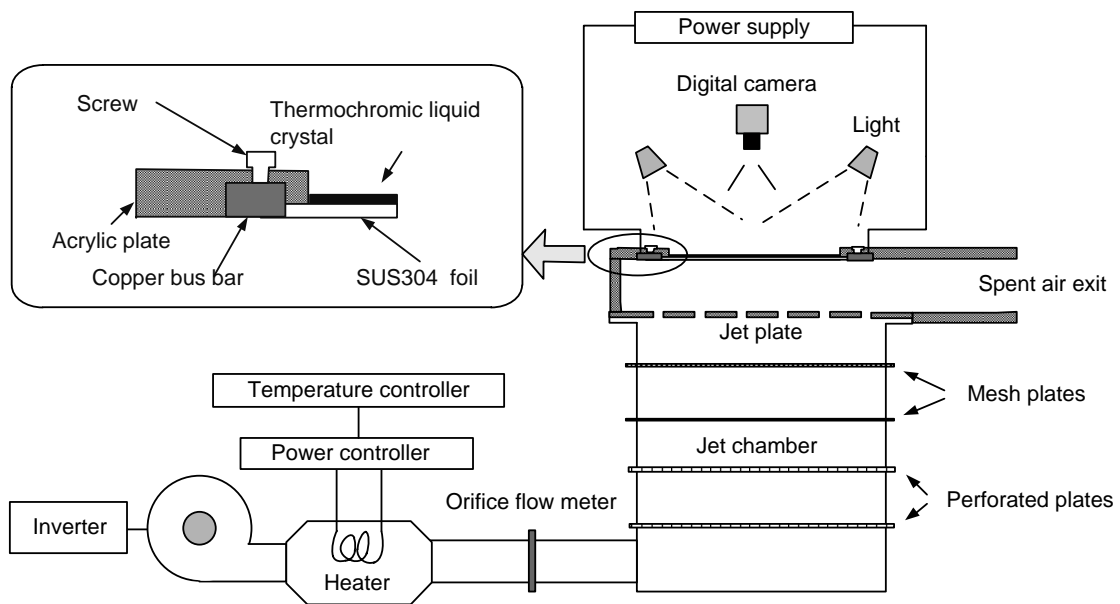
(b) แสดงลักษณะการจัดเรียงของเจ็ท

รูปที่ 1 แสดงโมเดลการทดลองของกลุ่มเจ็ท

2.2 ชุดทดลอง

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลอง อากาศถูกดูดผ่านโบลเวอร์ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ ก่อนที่จะไหลผ่าน

ไปยังออริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล และเข้าไปยังถังเก็บอากาศที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 360 mm x 360 mm สูง 850 mm ภายในประกอบด้วยแผ่นสแตนเลสเจาะรูและมุ้งลวดเพื่อบังคับให้เจ็ทอากาศที่ไหลออกจากรูเจ็ททั้งหมดสม่ำเสมอ สำหรับอุณหภูมิเจ็ทได้ควบคุมให้คงที่ $27.6\pm 0.5^\circ\text{C}$



รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดของชุดทดลอง

2.3 วิธีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเทอร์โมโครมิกลิคควิดคริสตัล (TLCs)

รูปที่ 2 แสดงรายละเอียดส่วนทดสอบ สำหรับการวัดการถ่ายเทความร้อน อากาศที่มีอุณหภูมิคงที่ถูกลดออกจากแผ่นออริฟิสและพุ่งชนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำจากแผ่นสแตนเลสแบบบาง (Stainless foil) ที่มีความหนา 0.03 mm ติดแผ่น TLCs ด้านหลังของแผ่นสแตนเลส (ด้านตรงข้ามกับที่เจ็ทพุ่งชน) แผ่นสแตนเลสถูกขึงให้ตึงกับแผ่นอะคริลิกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 72 mm x 300 mm โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และต่อแท่งทองแดงเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส อัตราการเกิดความร้อนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{input} = \frac{I^2 \cdot R}{A} \quad (1)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส และ A คือพื้นที่ของพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส

ในการทดลองใช้เจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_r - \dot{q}_c}{T_w - T_j} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{q}_r = \epsilon_{TLC}(\bar{T}_w - T_s)$ และ $\dot{q}_c = \bar{h}_c(\bar{T}_w - T_s)$ คืออัตราการสูญเสียความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังสิ่งแวดล้อมโดยการแผ่รังสีและการพาความร้อนตามลำดับ สำหรับ T_w คืออุณหภูมิผนังเฉพาะจุด, \bar{T}_w คืออุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิว, T_j คืออุณหภูมิของเจ็ท, σ คือค่าคงที่ Stefan-Boltzman, ϵ_{TLC} คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเทอร์โมโครมิกลิคควิดคริสตัล, T_s คืออุณหภูมิโดยรอบ, \bar{h}_c คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยบนแผ่น TLCs ติดสู่อากาศรอบๆ

การกระจายอุณหภูมิมบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน วัดโดยใช้แผ่น TLCs ที่ติดด้านหลังของแผ่นสแตนเลส ใช้กล้องดิจิทัลในการบันทึกภาพบนแผ่น TLCs ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลส่วนประกอบของสีหลัก คือ แดง(R) เขียว(G) น้ำเงิน(B) แล้วทำการแปลงเป็นระบบสี HSI (Hue,

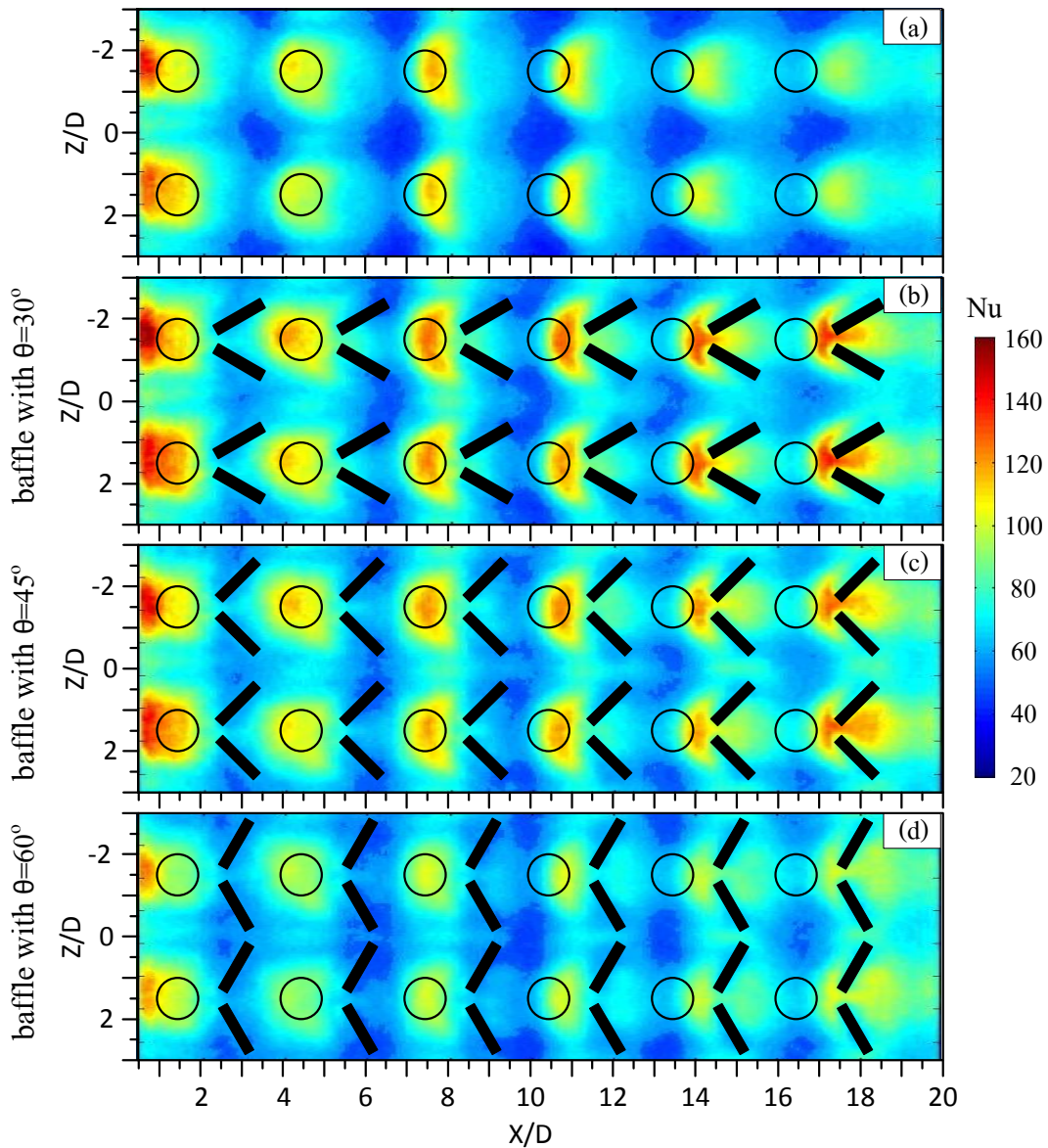
Saturation, Intensity) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพ นำค่า H_{us} เทียบกับข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้สายตาผู้สังเกตในการแยกแยะสีและประมาณค่าอุณหภูมิในช่วง 28°C ถึง 40°C ก่อนการทดลองได้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิกับสีที่ปรากฏบนแผ่น TLCs จากสมการ (2) สามารถคำนวณหาค่าตัวเลขนัมเบอร์ได้จากสมการ

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

ในที่นี้ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ สำหรับค่าตัวเลขนัมเบอร์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}D}{k} \quad (4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย \overline{h} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2) โดยการแทนค่า T_w เป็นอุณหภูมิเฉลี่ย $\overline{T_w}$



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายตัวเลขนัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($T_j=27^{\circ}\text{C}$, $Re=13,400$)

3. ผลการทดลอง

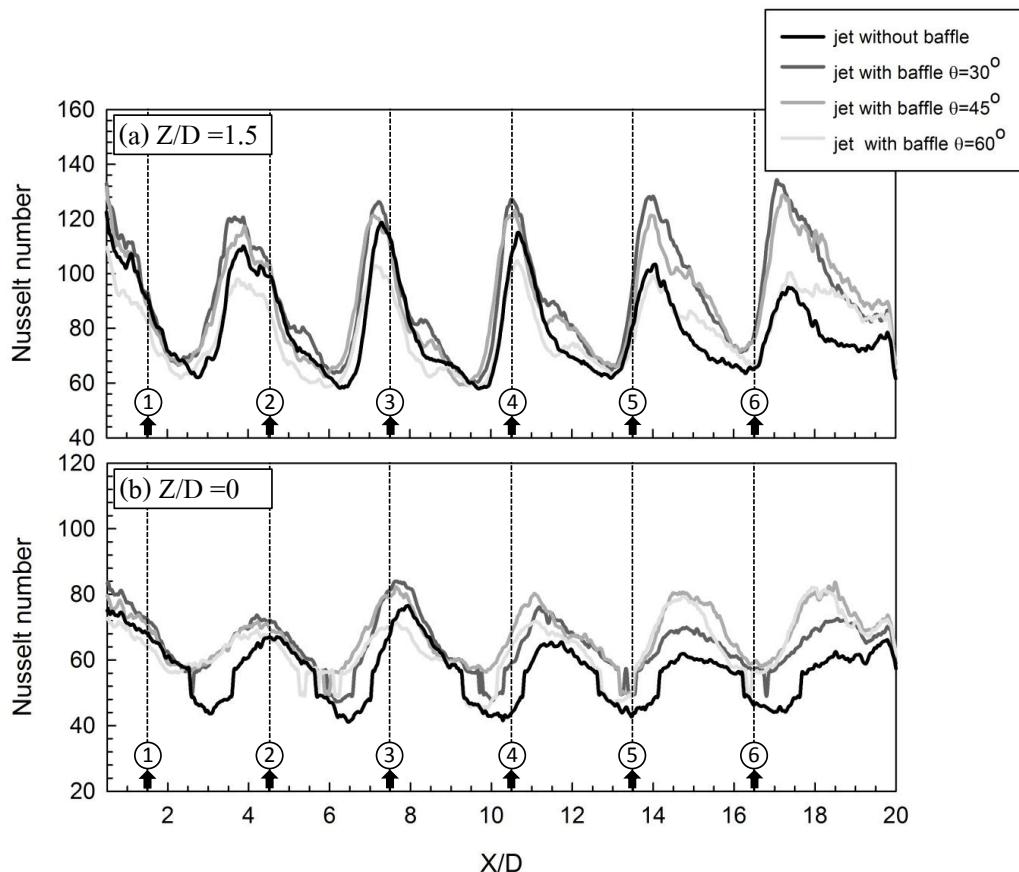
3.1 ลักษณะการกระจายของตัวเลขนัสเซิลด์นัมเบอร์

รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะสูงกว่าบริเวณรอบข้างและระหว่างแถวของเจ็ท รูปที่ 3(a) แสดงลักษณะการกระจายนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวพุ่งชนกรณีที่ไม่มีการติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีก พบว่าเจ็ทที่อยู่ปลายทางไหลได้รับอิทธิพลของกระแสไหลตัดทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณระหว่างแถวของเจ็ทมีอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อระยะ X/D เพิ่มขึ้น

รูปที่ 3(b), 3(c) และ 3(d) แสดงลักษณะการกระจายนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวพุ่งชนกรณีที่มีการติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีก การติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีก พบว่าการถ่ายเทความร้อนในปลายทางไหลและระหว่างแถวเจ็ทมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4(a) แสดงการเปลี่ยนแปลงนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $Z/D=1.5$ (แนวเดียวกับแถวเจ็ท) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกรณีติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีกให้ค่านัสเซิลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นในปลายทางไหล (ตรวจสอบคอลัมน์ 4-6) อย่างไรก็ตามกรณีติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีกที่มุมปะทะ 60° และกรณีที่ไม่มีการติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีกให้ค่านัสเซิลด์นัมเบอร์ลดลงในปลายทางไหล

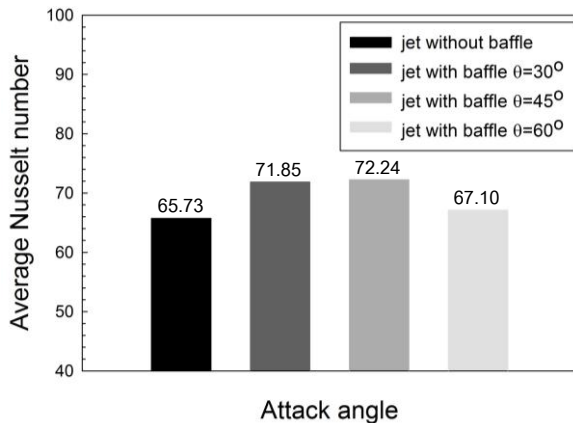
รูปที่ 4(b) แสดงการเปลี่ยนแปลงนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $Z/D=0$ (ระหว่างแถวเจ็ท) จากรูปพบว่ากรณีติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีกให้ค่านัสเซิลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นระหว่างแถวของเจ็ทกรณีติดตั้งสร้างกระแสมุขวนที่มุมปะทะ $\theta=45^\circ$ และ 60° นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งสร้างกระแสมุขวนแบบปีกและติดตั้งสร้างกระแสมุขวนที่มีมุมปะทะ $\theta=30^\circ$ ให้ค่านัสเซิลด์นัมเบอร์ลดลง



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (ก) $Z/D=1.5$ (ข) $Z/D=0$ ($T_j=27^\circ\text{C}$, $Re=13,400$)

3.2 นัสเซิลค่านัมเบอร์เฉลี่ย

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลค่านัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว จำนวนจากสมการที่ (4) โดยใช้ อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วง $-3 \leq Z/D \leq 3$ และ $0.5 \leq X/D \leq 20$ การ ติดตัวสร้างกระแสนวนแบบปีกสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเทียบกับกรณีพื้นผิวที่ไม่ มีการติดตัวสร้างกระแสนวนแบบปีกคิดเป็น 9.3%, 9.9% และ 2.0% สำหรับกรณีที่มีการติดตัวสร้างกระแสนวนแบบปีกที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ตามลำดับ



รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่านัสเซิลค่านัมเบอร์เฉลี่ย

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. การติดตัวสร้างกระแสนวนแบบปีกให้ผลการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในส่วนของปลายทางการไหล และบริเวณระหว่างแถวของเจ็ท
2. การติดตัวสร้างกระแสนวนแบบปีกสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับกรณีผิวเรียบคิดเป็น 9.3%, 9.9% และ 2.0% สำหรับกรณีที่มีการติดตัวสร้างกระแสนวนแบบปีกที่มุมปะทะ $\theta=30^\circ$, 45° และ 60° ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Viskanta, R. (1993). Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 111-134.
- [2] Baughn, J. W. and Shimizu, S. (1989). Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. *Heat and Mass Transfer International Journal*, Vol. 111, pp. 1096-1098.
- [3] ชยุด นันทคูสิต (2552). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มเจ็ทพุ่งชน โดยลดอิทธิพลจากกระแสไหลตัดด้วยวิธีปรับปรุง รูปแบบปากทางออกเจ็ท, *รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ประจำปีงบประมาณ 2552*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [4] Esposito, E. I. (2006). Jet Impingement cooling configurations for gas turbine combustion, *Thesis of the Departmen of Mechanical Engineering, Louisiana State University*.
- [5] Biswas, G. Torii, K. Fujii, D. and Nishino, K. (1996). Numerical and experimental determination of flow structure and heat transfer effects of longitudinal vortices in a channel flow, *International Journal Heat and Mass Transfer*. Vol. 39(16), pp. 3441-3451.
- [6] Tian, L.-T. He, Y.-L. Lei, Y.-G. and Tao, W.-Q. (2009). Numerical study of fluid flow and heat transfer in a flat-plate channel with longitudinal vortex generators by applying field synergy principle analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 111-120.

ภาคผนวก ข.

บทความสำหรับเผยแพร่ 2

“Heat Transfer Enhancement for Row of Impinging Jets in Cross-flow with
some Baffle Attachments”

The 15th International Heat Transfer Conference 2014

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT FOR ROW OF IMPINGING JETS IN CROSS-FLOW WITH SOME BAFFLE ATTACHMENTS

Rattanakorn Pansang¹, Makatar Wae-hayee¹, Passakorn Vessakosol¹ and Chayut Nuntadusit^{1*}

¹Energy Technology Research Center and Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat yai, Songkhla 90112, Thailand

ABSTRACT

The aim of this research is to study the effect of mounting baffles on heat transfer enhancement for a row of impinging jets within cross-flow. A row of 4 air jets was directly discharged from round orifices with on inline arrangement and impinged on the inner surface of the rectangular wind tunnel. The orifice diameter (D) was 13.2 mm, jet-to-impingement surface distance and jet-to-jet distance were fixed at $H=2D$ and $S=3D$, respectively. To study the effect of the cross-flow, the jet velocity was fixed at 15 m/s ($Re=13,400$) and the cross-flow velocity was varied corresponding to the velocity ratio (jet velocity /cross-flow velocity) at $VR=3, 5$ and 7 . A pair of rectangular baffles each with length of $1.3D$, height of $0.6D$ and thickness of 3 mm was attached in a V-shaped arrangement on the surface on the upstream side of each impinging jet. The angle of attack was defined as an angle between the baffle to the cross-flow and was varied to give $\theta=30^\circ, 45^\circ$ and 60° . The heat transfer characteristic was visualized by using a Thermochromic Liquid Crystal sheet (TLCs) and the Nusselt number was evaluated by using image processing method. Numerical simulation was also employed to investigate the flow field. The results show that the heat transfer rate for the case with baffle attachment at $\theta=60^\circ$ is higher than the case of no baffle attachment by about 55.32%, 29.3% and 18.63% for $VR=3, 5$ and 7 , respectively. This is due to the baffle attachment promoting the turbulence intensity in the jet flow before impingement.

KEY WORDS: Heat transfer enhancement, Convection, Measurement and instrumentation

1. INTRODUCTION

Jet impingement is widely used in various industrial applications because it offers high localized heating and cooling rates. The applications include tempering of glass, drying of paper, cooling of turbine blade and electronic components. Heat transfer rate on an impingement surface is governed by two key factors: (1) impingement velocity or momentum and (2) turbulence intensity within jet near the impingement surface. In general, the jet flow behind the end of a potential core begins to radially spread resulting in the reduction of axial velocity and increases the turbulence intensity. Therefore, the maximum heat transfer rate is found at an optimum jet-to-plate distance which the end of a potential core impinges on the wall [1-3].

Usually, the multiple impinging jets are applied on a large heat transfer surface to attain high and uniform heat transfer rate on overall surface. In case of multiple impinging jets under a confined space, cross-flow is generated by the spent air of the impinging jet in upstream region. Consequently, the impinging jets in the downstream region are significantly influenced by the cross-flow. The downstream impinging jets, subsequently, tend to deflect and mix with the cross-flow before impingement resulting in decreasing impingement momentum on wall and decreasing its heat transfer rate [4, 5].

To eliminate the cross-flow effect in confined channel, the impingement wall was drilled with effusion holes [6, 7]. Elongated orifices were replaced with conventional round orifices to reduce the cross-flow effect [8].

*Corresponding Author: chayut@me.psu.ac.th

Mounting baffles on a heat transfer surface associated with an impinging jet under cross-flow was also studied to determine if it enhances the heat transfer rate. However, the effect of the cross-flow on the impinging jets with the baffle mounting is still unclear [9].

The aim of this study is to investigate the effect of baffle attachments and cross-flow velocity on flow and heat transfer characteristics for a row of impinging jets in cross-flow. The velocity ratio (VR , cross-flow velocity/jet velocity) and angle of attack for baffle attachments were examined. The local temperature distribution on the impingement surface was measured using a Thermo-chromic Liquid Crystal sheet (TLCs), and the local heat transfer coefficient was evaluated using an image processing method. The numerical simulation was employed to reveal the flow characteristics.

2. EXPERIMENTAL METHOD AND PARAMETERS

The experimental model is shown in Fig.1. Four air jets were discharged from a row of 4 round orifices with an inline arrangement and impinged on the opposite surface in a wind tunnel with rectangular cross section. The cross-flow was stimulated by introducing air through the test section. The cross-flow crossed perpendicularly to the impinging jets. The origin of the Cartesian coordinates was located on the impingement surface. The X-, Y- and Z-axis are in the cross-flow streamwise, direction normal to impingement surface, and spanwise of wind tunnel, respectively. In this study, only two of the impinging jets in the center of the row of jets are considered. The considered area is indicated by dashed lines in Fig. 1(b).

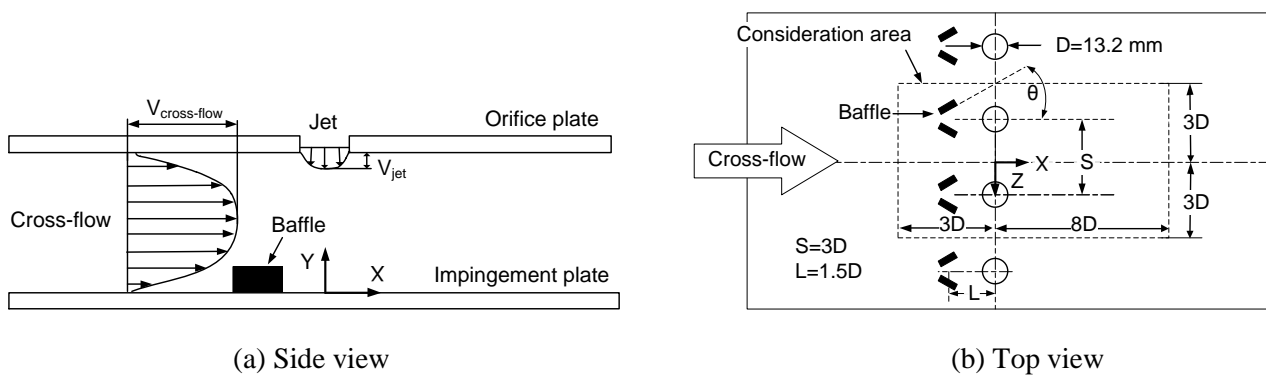


Fig. 1 Experimental model used in this study

The diameter of the round orifices (D) is 13.2 mm. The jet-to-plate (wind tunnel height) and jet-to-jet distances were fixed at $H=2D$ and $S=3D$, respectively. The jet velocity was fixed at 15 m/s corresponding to $Re=13,400$, and the cross-flow velocity was varied corresponding to velocity ratios (jet velocity/cross-flow velocity) of $VR=3, 5$ and 7 .

The geometry of the baffles was rectangular with a length of $1.3D$, a height of $0.6D$ and a thickness of 3 mm. A pair of baffles were attached in a V-shaped arrangement in the upstream region of each impinging jet at $Z=-1.5D$, and baffle-to-baffle distance were $0.5D$. The angle of attack was defined as an angle between the baffle and the cross-flow direction and was varied from $\theta=30^\circ, 45^\circ$ and 60° as is also shown in Fig. 1(a). To ignore the thermal conduction from surface through the baffles, these baffles were made of acrylic, considered as an insulator.

3. EXPERIMENTAL SETUP AND METHOD

3.1 Experimental Apparatus The experimental setup consists of two parts; 1: jet flow and 2: cross-flow as shown in Fig.2. The jet flow was generated by introducing air through the temperature controlled chamber equipped with heaters, calibrated orifice flow meter, jet chamber and jet plate before entering the test section.

The jet chamber has a constant cross-section of 360-mm×360-mm and height of 850-mm and was equipped with two layers of perforated plates and two layers of mesh sheets to achieve a uniform flow field approaching the jet plate.

The simulated cross-flow was produced by introducing air through the inlet chamber, flow straightener, two layers of mesh sheets, test section and air chamber installed with perforated plates by using another blower as indicated in Fig.2. The cross-section of the wind tunnel was rectangular with height of 26.4 mm (2D) and width of 300 mm. The length of the calming section of the wind tunnel was 200 cm which was sufficient to achieve a fully developed flow in the test section.

A Pitot-static tube was located upstream of the test section to measure cross-flow velocity at the center of the channel. For all experiments, the inlet temperatures of the impinging jets and cross-flow were kept constant at 27.6°C by using a temperature and power controller.

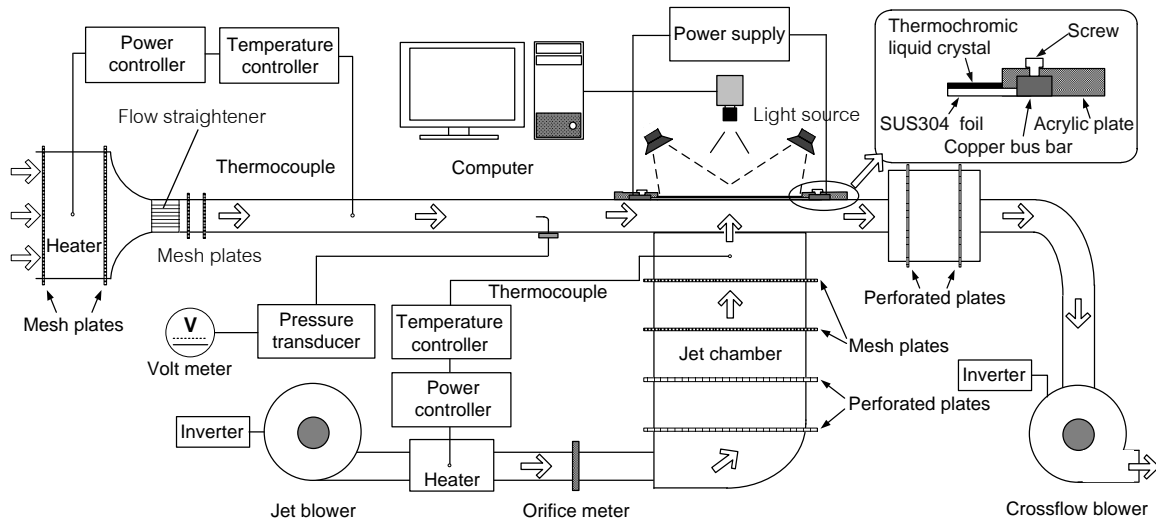


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

3.2 Heat Transfer Measurement The test section for the heat transfer measurement was directly mounted to the wind tunnel as shown in Fig.3. The air jets with constant temperature discharging from the orifice plate were impinging on the heated surface for cooling. The wall temperature (T_w) on the impingement surface was measured by using a TLC sheet (Omega, LCS-95, USA) that was attached on the rear of this surface as shown in Fig.3. The heat transfer surface was made of stainless steel foil with a thickness of 30 μm installed between a pair of copper bus bars. The heat transfer surface was heated by a DC power supply through copper bus bars. The electrical energy dissipated in the stainless steel foil can be determined from Joule effect

$$\dot{q}_{input} = \frac{I^2 \cdot R}{A} \quad (1)$$

The local heat transfer coefficient due to the forced convection of the impinging jets, h , can be evaluated from

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_r - \dot{q}_c}{T_w - T_j} \quad (2)$$

where $\dot{q}_r = \sigma \varepsilon_{TLC} (T_w^4 - T_s^4)$ and $\dot{q}_c = h_c (T_w - T_s)$ are the heat losses from the rear side of TLC sheet to the environment by radiation and natural convection, respectively; T_w and T_j are the wall and jet temperatures; σ is the Stefan-Boltzman constant; ε_{TLC} is the emissive coefficient of the TLC sheet; T_s is the surrounding temperature; and h_c is the natural heat transfer coefficient calculated from the natural convective heat transfer from the heat transfer surface to the surrounding.

A digital camera was used to capture color patterns on the TLC sheet. The images of color pattern were subsequently converted from the RGB (red, green and blue) color system to the HSI (Hue, Saturation and Intensity) color system. The Hue (H) value was used to correlate the color of TLCs to their temperature in range of 28-40°C via a calibration. The local Nusselt number was calculated as

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

here, D is the diameter of the jet orifice and k is thermal conductivity of the air jet.

3.3 Numerical Simulation A 3-D numerical simulation was carried out with the ANSYS ver. 13.0 (Fluent) software was employed to visualize the flow characteristics of the jets and the cross-flow. The calculation used the finite volume method to solve the governing differential equations with boundary conditions. A numerical model was identically created to the experimental model as shown in Fig.3. A SST $k - \omega$ turbulence model was applied due to its accurate prediction for impingement problems and moderate computational cost [10]. This turbulence model has also been employed to accurately predict the flow and heat transfer characteristics of impinging jets under cross-flow [11 and 12].

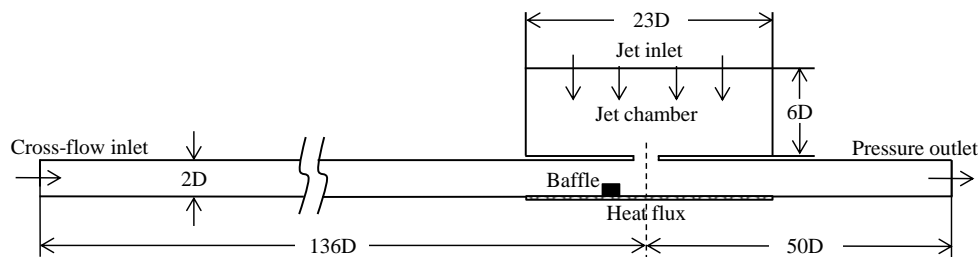


Fig. 3 Numerical model

The majority of the generated grid was a rectangular shape as shown in Fig.4. The elements were concentrated near the wall of wind tunnel and mixing region. The boundary conditions were identically specified to experimental conditions. The outlet pressure was kept constant at 1 atm. A solution method was based on the SIMPLE algorithm with second order upwind for all spatial discretization. The solution was considered to be converged when the normalized residual of the algebraic equation was less than a prescribed value of 1.0×10^{-4} [11]. Fig. 5 shows the wall y^+ distributions near the impingement surface on X-axis at different number of grid elements for case of impinging jets with no baffle attachment at $VR=3$. The wall y^+ is dimensionless wall distance of first grid next to the impingement wall. It is defined as the product between friction velocity and normal distance from the impingement wall to the first grid next to the wall divided by local kinematic viscosity of the air flow. It is found that the wall y^+ at each location is lower than 5, when the number element is increased to 2,994,154 elements. The first grid next to impingement wall is within viscous sublayer in boundary layer. This grid resolution is sufficient to predict the flow near the impingement wall accurately.

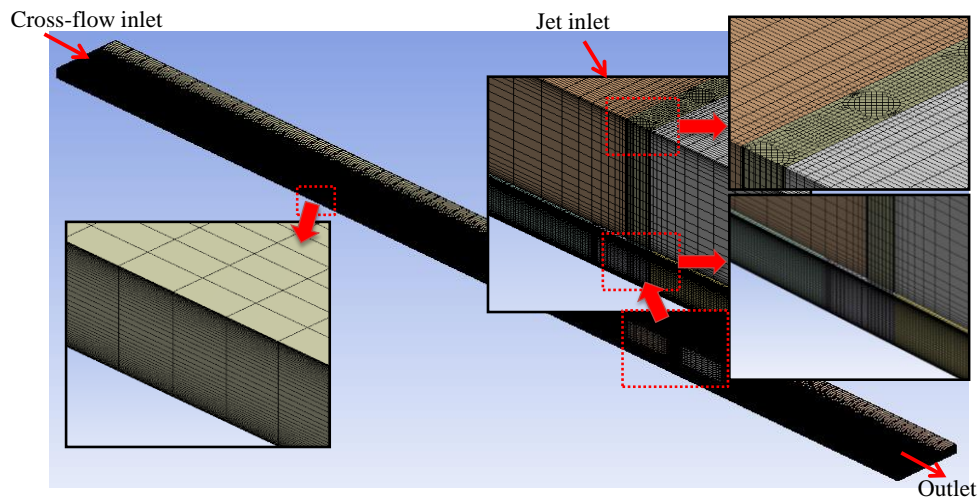


Fig. 4 The details of the generated grid

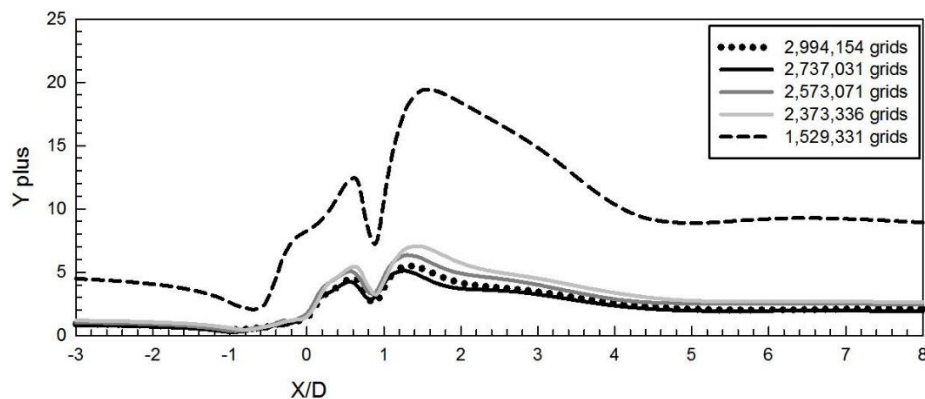


Fig. 5 Effect of grid dependency on wall y^+ distribution near the impingement surface on X-axis for case of impinging jets with no baffle attachment at $VR=3$

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Flow Characteristics Velocity vectors and velocity contours of impinging jet in cross-flow on X-Y plane passing center of orifice are shown in Fig. 6. The results reveal that the jet is more deflected downward from the location of orifice when the cross-flow velocity is increased (or VR decreases). For the case of baffle attachment at $VR=7$, the wall jet in upstream region of the impingement region collides with the rear side of baffle and the circulation flow is generated. While, the wall jet in downstream of impingement region flows along the wall. When the cross-flow velocity is increased as in the case of $VR=3$, the cross-flow detaches from the baffle and reattaches on the surface and the circulation flow in upstream section of the impingement region disappears and the jet in downstream region strongly mixed with the cross-flow when compared with case of $VR=7$.

The contours of turbulence kinetic energy of impinging jet in cross-flow on X-Y plane passing the center of orifice are shown in Fig. 7. The turbulence kinetic energy around the jet is higher than the core of jet due to the mixing between the jet and cross-flow. For the case of low cross-flow velocity ($VR=7$), the turbulence kinetic energy in upstream region of impingement region is high in the wall jet region due to the interaction between wall jet and cross-flow, while the turbulence kinetic energy in downstream region of impingement region is high in wall jet region and region behind the jet due to the mixing of jet with cross-flow. For case of the baffle attachment, the area of high turbulence kinetic energy is slightly larger when compare to case with no baffle attachment. This can be referred to the larger circulation flow behind the baffle. There is small

effect of baffle attachment on contour of turbulent kinetic energy for the case of $VR=7$. For case of high cross-flow velocity ($VR=3$), the turbulence kinetic energy in the upstream region of jet becomes lower when compared to the case of $VR=7$. This is due to the deflection of the cross-flow. While, the turbulence kinetic energy becomes larger in the downstream region due to strong mixing between the jet and cross-flow. The baffle attachment tends to promote the turbulence kinetic energy in the downstream region of the impingement region, particularly for the case attack of angle $\theta=60^\circ$.

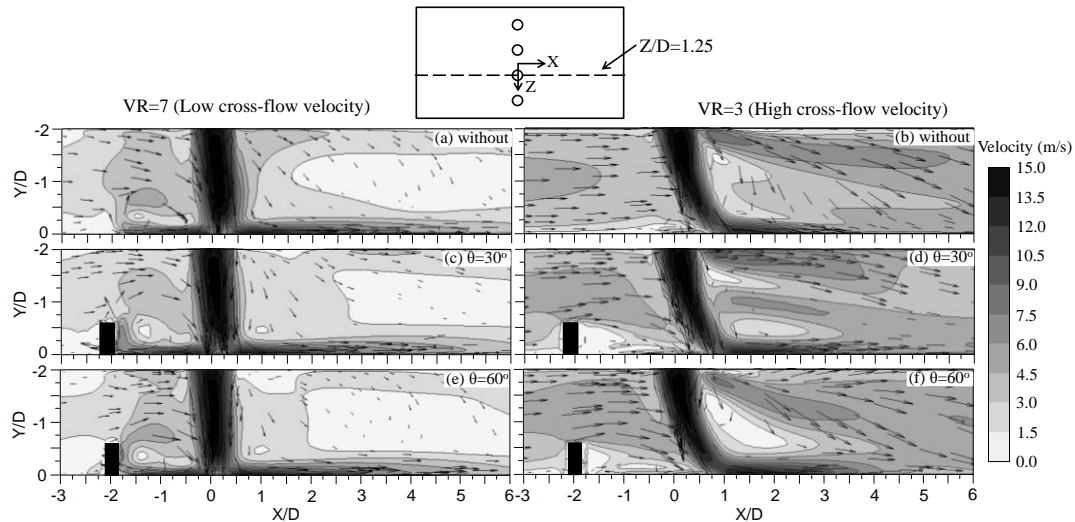


Fig. 6 Vectors and contours of velocity on X-Y plane at $Z/D=1.25$ (CFD results)

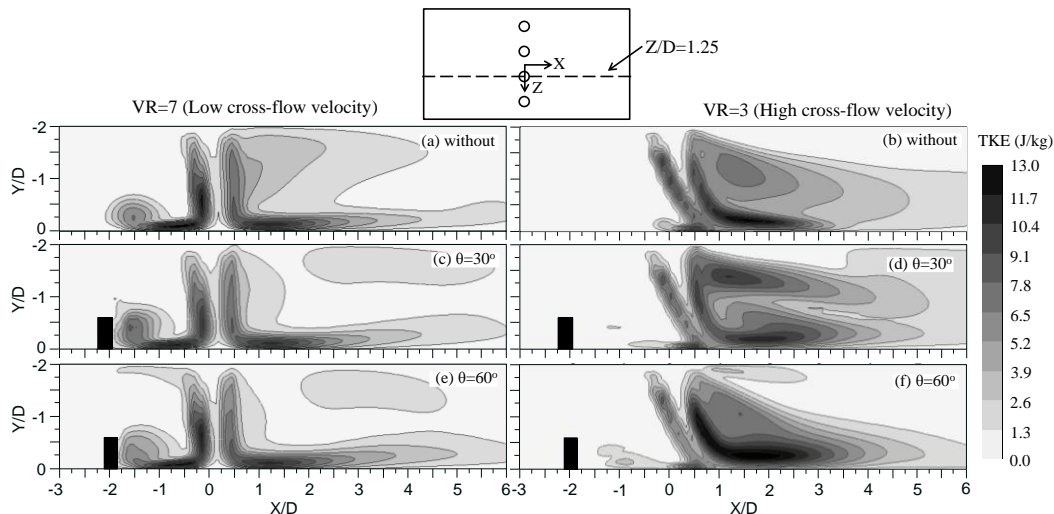


Fig. 7 Contours of turbulence kinetic energy on X-Y plane at $Z/D=1.25$ (CFD results)

The velocity vectors and velocity contours in the Y-component on Z-X plane at 1.5-mm above the impingement surface are shown in Fig. 8. The Y-component velocity represents the impingement velocity in direction normal to the surface. The positive velocity indicates that the flow is in the direction of the impingement surface. The minus velocity means the flow is in the direction away from the surface. Marked black circle indicates the location of each orifice. When the cross-flow velocity is increased, the impingement region shifts downstream for the case of $VR=3$. The upward flow from wall can be detected in the upstream region and the region between the adjacent impinging jets due to the collision between the wall jet and cross-flow and collision between the wall jet from adjacent impinging jets, respectively. There is no effect of the baffle attachment on the velocity in the impingement region. The baffle attachment only affects the velocity in upstream and downstream of impingement region. For the case of $VR=3$, the velocity in

upstream region of jet impingement for the case with baffle attachment is larger than case of no baffle attachment. This may be due to the flow reattachment behind the baffle.

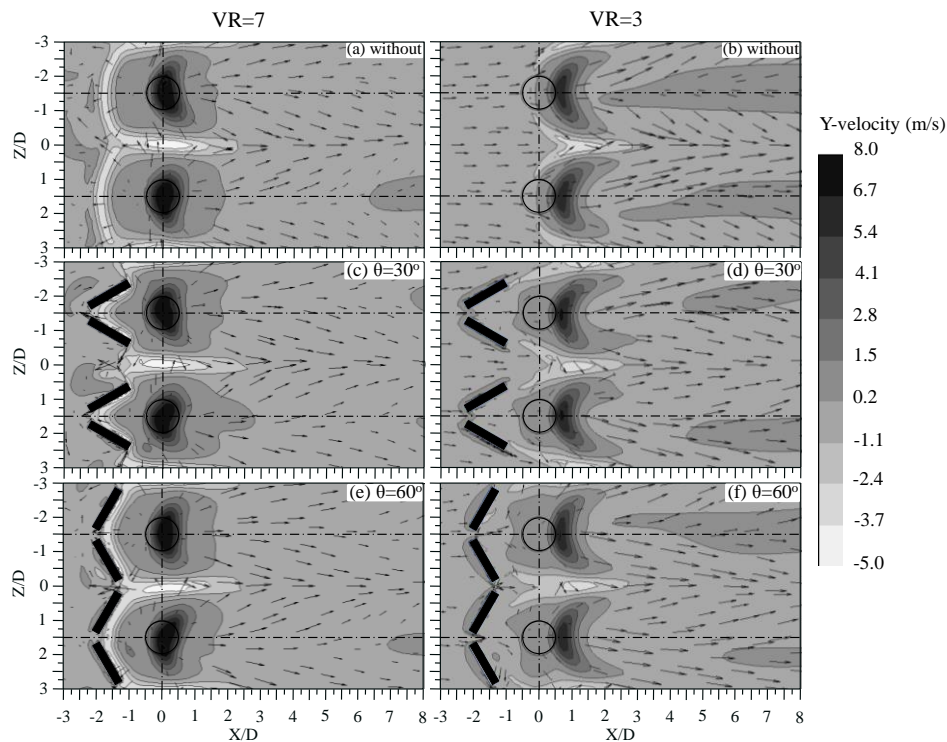


Fig. 8 Contours of Y-component velocity in Z-X plane (CFD results, on plane above from impingement surface of 1.5- mm)

The turbulence kinetic energy contours on Z-X plane at 1.5-mm above the impingement surface are shown in Fig. 9. For the case of low cross-flow velocity ($VR=7$), the region with high turbulence kinetic energy can be detected in wall jet in both upstream and downstream sections of impingement region. The region of high turbulence kinetic energy in upstream wall jet is larger than that of the downstream one. The contour of turbulence kinetic energy in upstream region is disturbed by the baffle attachment. While, the turbulence kinetic energy in the downstream region is almost the same for all cases. In addition, the turbulence kinetic energy in impingement region is low which is similar to that found in a common impinging jet without a cross-flow at small jet-to-impingement surface distance. As the cross-flow velocity is increased ($VR=3$), the region with high turbulence kinetic energy can be detected only from the wall jet in downstream region because wall jet in the upstream region is removed by the cross-flow. The baffle attachment increases the turbulence kinetic energy in the upstream section of impingement region due to the reattachment flow behind the baffle, particularly for the case of the baffle attachment with the angle of attack $\theta=60^\circ$.

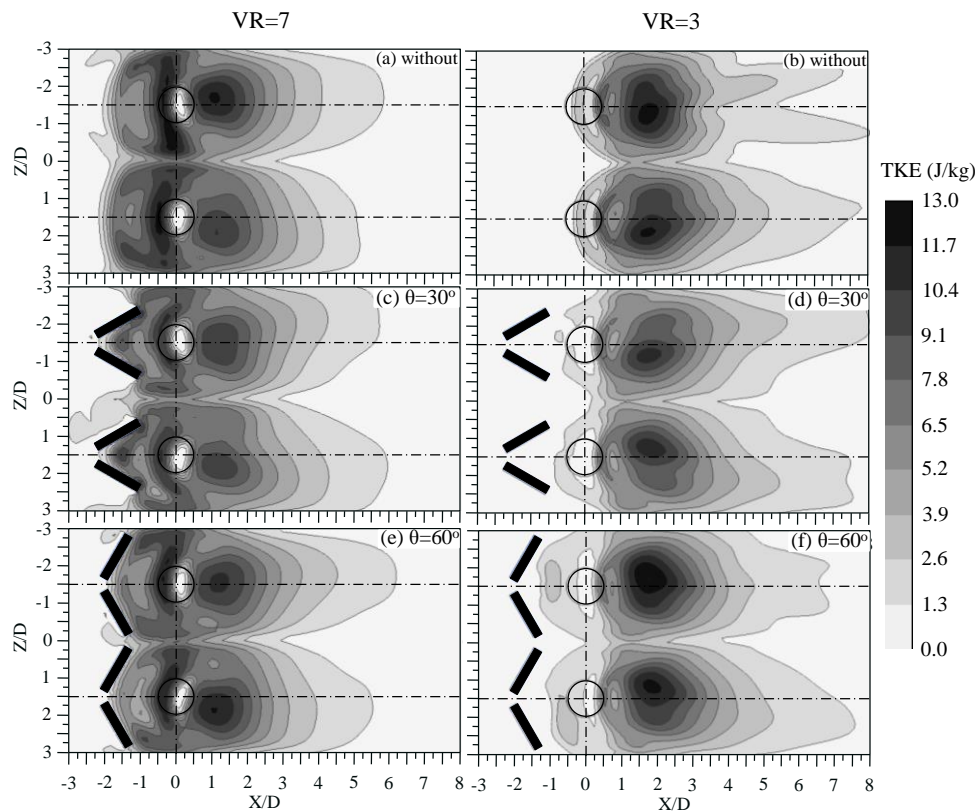


Fig. 9 Turbulence kinetic energy on Z-X plane (CFD results, on plane above from impingement surface of 1.5-mm)

4.2 Local Nusselt Number The Nusselt number distributions on the impingement surface are shown in Fig. 10. As the cross-flow velocity is increased (VR decreasing to VR=3), the high Nusselt number region within the impingement region ($Nu > 120$) is shifted downstream by the cross-flow. The Nusselt number in the upstream section of the impingement region becomes lower when the cross-flow velocity is increased. This corresponds to the contraction of high areas of Y-component velocity contours in the upstream of impingement region as shown previously in Fig. 9. In contrast, the Nusselt number in the downstream region becomes higher when the cross-flow velocity is increased.

The effect of the baffle attachment reveals that the Nusselt number in the area around the baffle seems to be higher when the cross-flow velocity becomes higher. Almost all Nusselt numbers for the case of the baffle attachment in impingement regions are also high when compare to the case of no baffle attachment at the same cross-flow velocity. The effect of the baffle attachment on the increasing local heat transfer distributions on the impingement surface can be detected by two parts: (1) in the area around baffle attachment and (2) in the impingement region.

The Nusselt numbers in the area around baffle attachment are slightly higher than the case of no baffle attachment. For baffle attachment with the angle of attack $\theta = 60^\circ$, the area of heat transfer enhancement is extended. It is more significant when cross-flow velocity is increased. It can be observed in Fig.11 in the area of the baffle attachment ($X/D = -1.5$ is the center of baffle attachment) that Nusselt number is higher (compare with the case of no baffle attachment) when the angle of attack is larger and the cross-flow velocity is increased. This can be attributed to the fact that when cross-flow velocity is increased, the circulation flow behind the baffle must be stronger resulting in increasing turbulence intensity. Additionally the area of increased turbulence intensity was extended when the angle of attack becomes larger due to the effect of the extending blocked area.

The Nusselt number in the impingement region with baffles is considerably higher than the case of no baffle attachment. Especially for the case of high cross-flow velocity (VR=3) and large angle of attack ($\theta = 60^\circ$) as

shown in Fig. 10(l), areas of high Nusselt number ($Nu > 160$) are the largest. It can also be observed in Fig.11(c) that the highest Nusselt number along the centerline orifice for the case of $VR=3$ and baffle attachment is obtained with attack of angle $\theta=60^\circ$. The increased Nusselt number in this impingement region is attributed to the cross-flow detaching from the baffle and interacting strongly with the jet at high cross-flow velocity resulting in an increased turbulence intensity of the jet before impingement. This can be observed from the flow characteristics as shown in Fig. 6(b), (d) and (f). It is seen that the contours of cross-flow velocity before interacting with the jet, for the case of baffle attachment, is higher than the case of no baffle attachment.

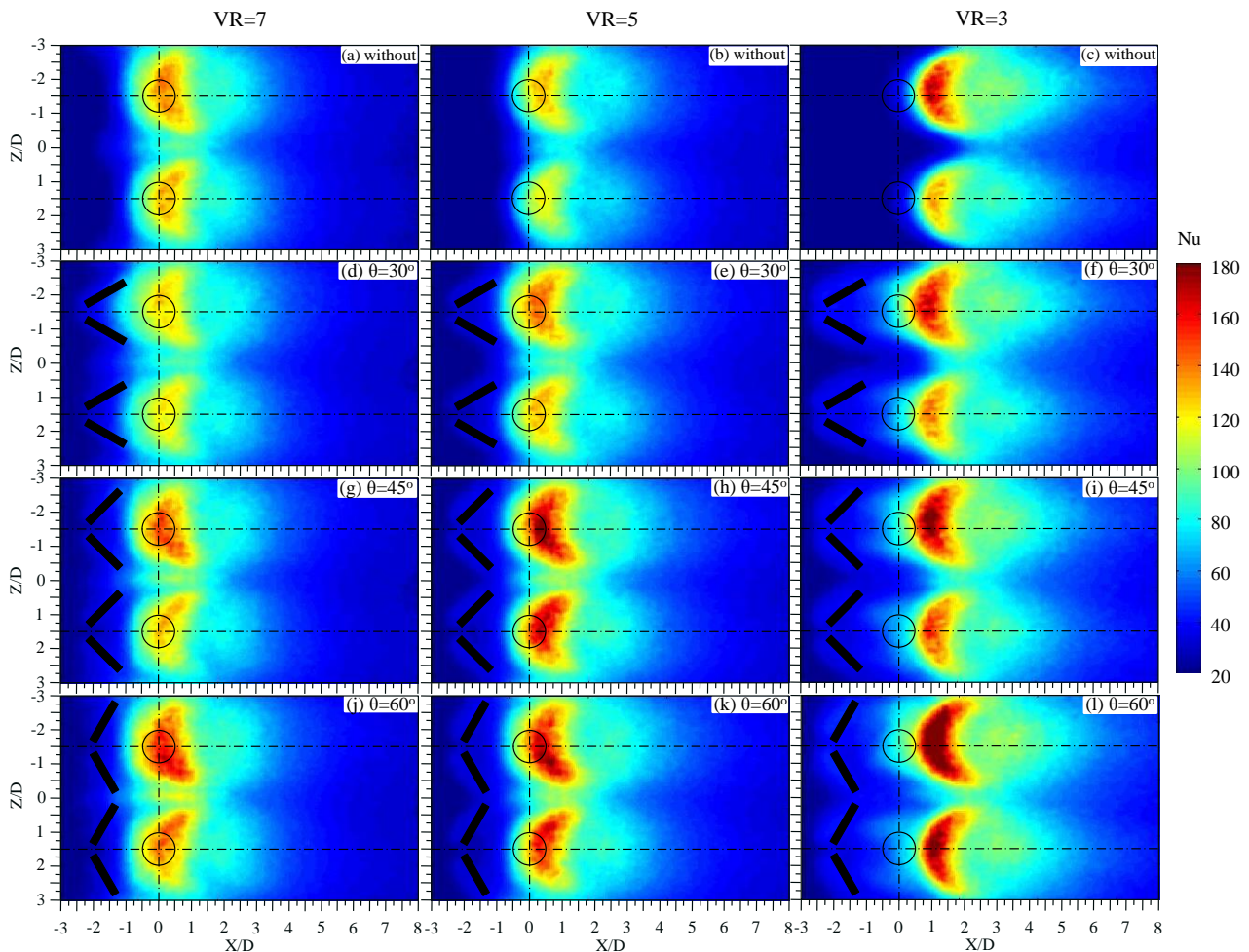


Fig. 10 Nusselt number distributions on the impingement surface (experimental results, $T_j=27.6^\circ\text{C}$)

Local Nusselt number distributions in the X-axis direction at $Z/D=1.5$ (passing the center of orifice) and at $Z/D=0.0$ (passing the interval between orifices) are shown in Fig. 11 and 12, respectively. The CFD results for a row of impinging jets with no baffle attachment at the same boundary condition as the experiment was chosen for comparing with the experimental results, as also shown in Fig.11. The difference between the CFD and experimental results for $VR=5$ and 7 is small. However, the difference for case of $VR=3$ seems to be large in range of $2 < X/D < 5$ for $VR=3$. This results from the limitation of the turbulence model used for the prediction at high cross-flow velocity.

From this Fig.10, the effect of baffle attachment shows that the Nusselt number in the upstream region (baffle attachment region) and stagnation region is higher than the case of no baffle attachment. Similarly, the Nusselt number on the line $Z/D=0$ (passing orifice interval) for the case of baffle attachment is also higher than the case of no baffle attachment as shown in Fig.12. The Nusselt number for the case of angle of attack of $\theta=60^\circ$ is larger than the case of the angle of attack of $\theta=30^\circ$. In addition, the heat transfer

enhancement seems to be more significant when cross-flow velocity is increased as shown in Fig.12(c). The Nusselt number distributions in the upstream region for the case of baffle attachment are considerably higher than the case of no baffle attachment and the peak of the Nusselt number graph for the case with $VR=3$ and attack of angle $\theta=60^\circ$ is clearly the highest.

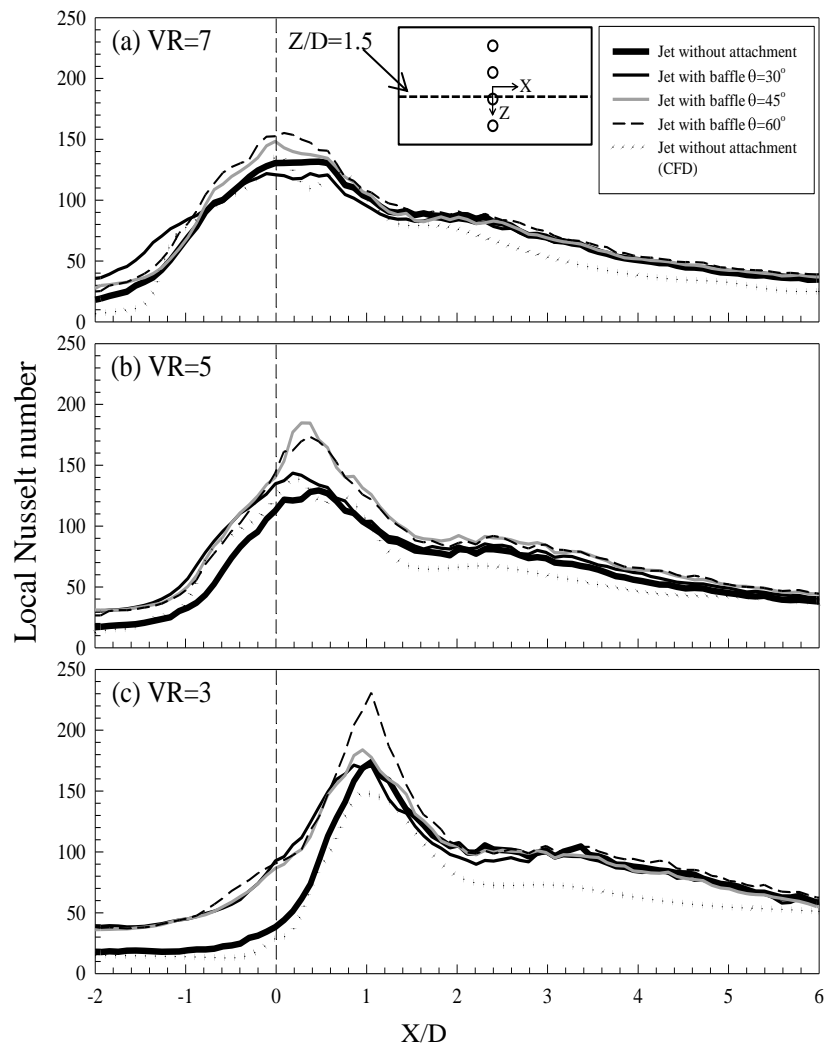


Fig. 11 Local Nusselt number distributions along X-axis at $Z/D=1.5$ (experimental results, $T_j=27.6^\circ\text{C}$)

4.2 Overall Average Nusselt Number The spanwise average Nusselt number calculated from the average temperature in the range of $-3 \leq Z/D \leq 3$ at each X/D is shown in Fig.13. Spanwise average Nusselt number distributions for the case of a plain surface (with no impinging jets and baffle attachment), surface with baffle attachment (with no impinging jets) and surface with both impinging jets and baffle attachment are compared. For the case of a plain surface, the spanwise average Nusselt number is slightly higher when the cross-flow velocity increases. This can be explained by the fact that the higher velocity of air flow parallel to the surface can reduce the thickness of the thermal boundary layer on the heat transfer surface. Also, almost all of spanwise average Nusselt number graph, with baffle attachment, is higher when the cross-flow velocity is high; however, the angle of attack has almost no effect on the Nusselt number. Exceptionally for the case of $\theta=45^\circ$ at $VR=5$, the spanwise average Nusselt number is much higher than the others.

At low cross-flow velocity ($VR=7$) as shown in Fig. 13(a), the spanwise average values for the case of impinging jets with and without baffle attachment seem to be comparable. When the cross-flow velocity is

increased, the spanwise average values for the case of impinging jets with baffle attachment are obviously higher than the case of no baffle attachment. At highest cross-flow velocity ($VR=3$) as shown in Fig.13(c), the effect of angle of attack can be clearly observed, with the spanwise average values becoming higher with larger angle of attack.

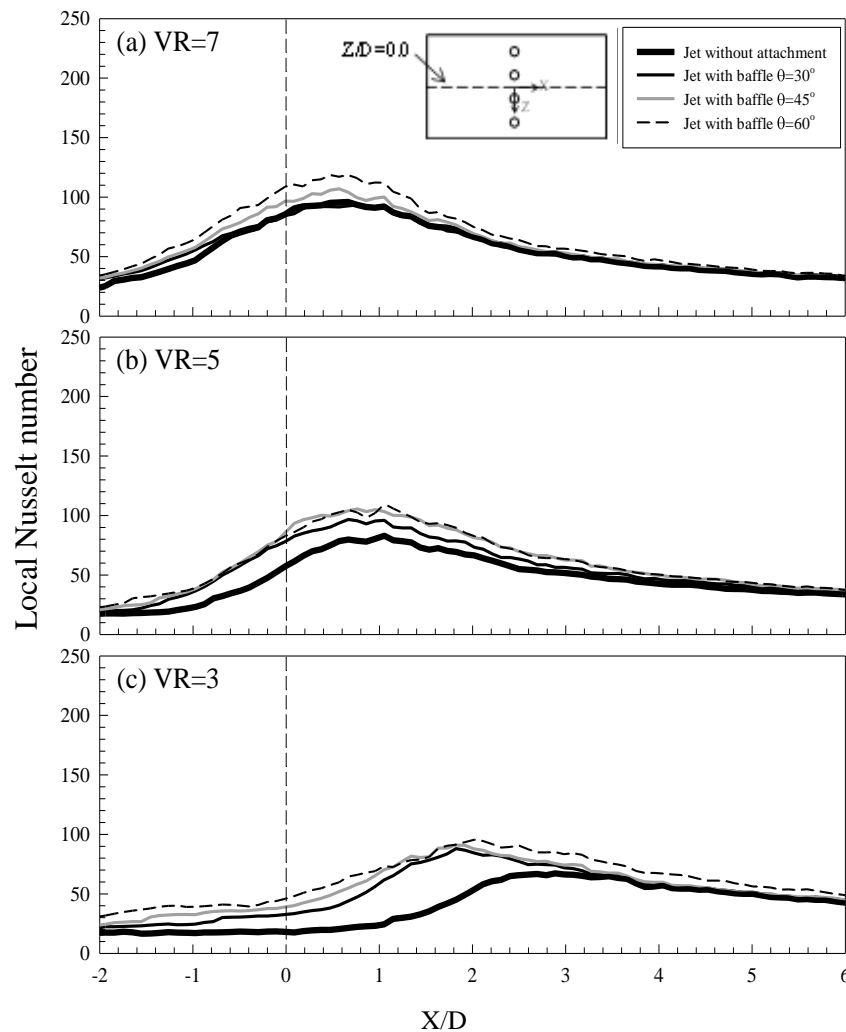


Fig. 12 Local Nusselt number distributions along X-axis at $Z/D=0$ (experimental results, $T_f=27.6$ °C)

The overall average Nusselt Number was calculated by averaging the local temperature in the areas of $-3D \leq X \leq 8D$ and $-3D \leq Z \leq 8D$, shown in Fig.14. All average values for the case of baffle attachments are higher than the case of no baffle attachment. For the case of no baffle attachment, the average value increases when VR increases (cross-flow velocity decreases). For the case of baffle attachments, average values between $VR=5$ and 7 are comparable while the ones at $VR=3$ are higher than the other VR . These results show that the effect of baffle attachments is very significant when the cross-flow velocity increases.

The effect of angle of attack on the overall average Nusselt Number shows that the average values are higher when the angle of attack becomes larger. Especially for the case of the largest angle of attack, $\theta=60^\circ$, their average values are higher than the case of no baffle attachment by about 55.3%, 29.3% and 18.6% for $VR=3, 5$ and 7 , respectively.

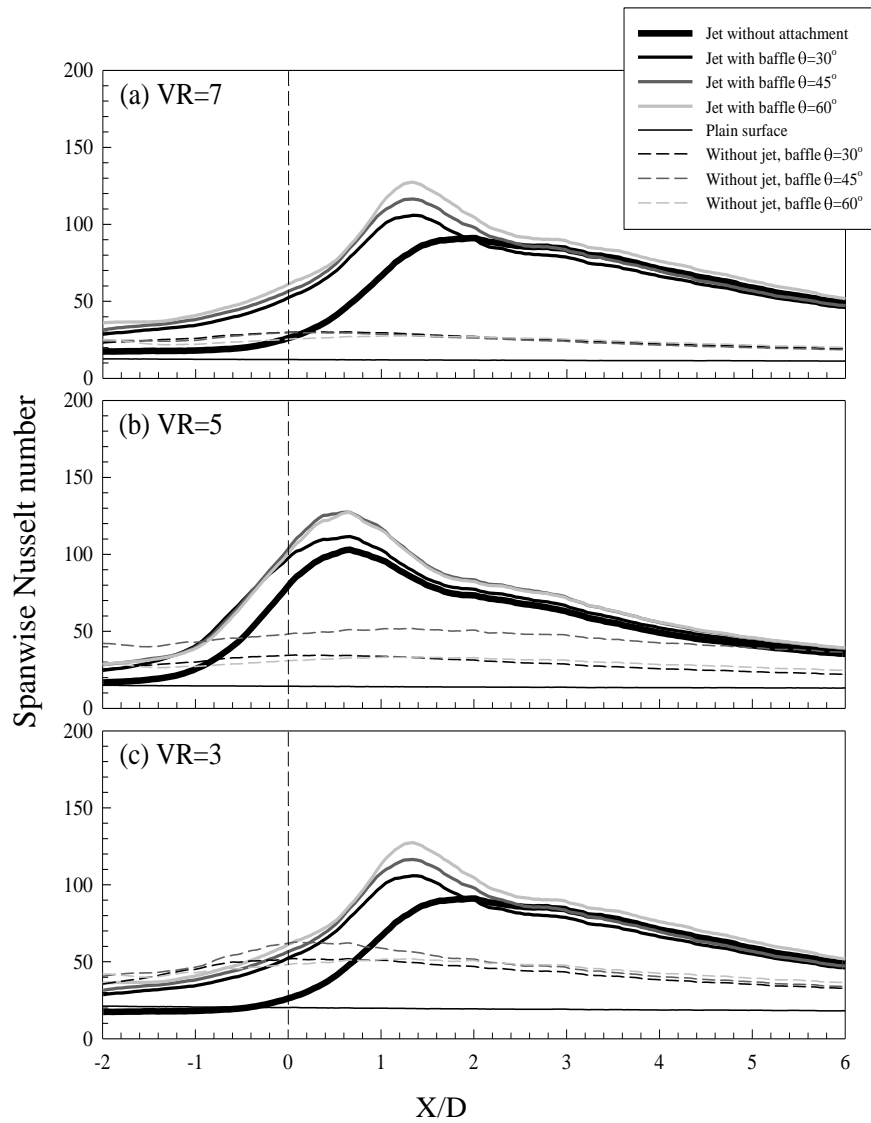


Fig. 13 Spanwise average Nusselt number for the case of a plain surface (with no impinging jets and baffle attachment), surface with baffle attachment (with no impinging jets) and surface with both impinging jets and baffle attachment (experimental results, $T_j=27.6^\circ\text{C}$)

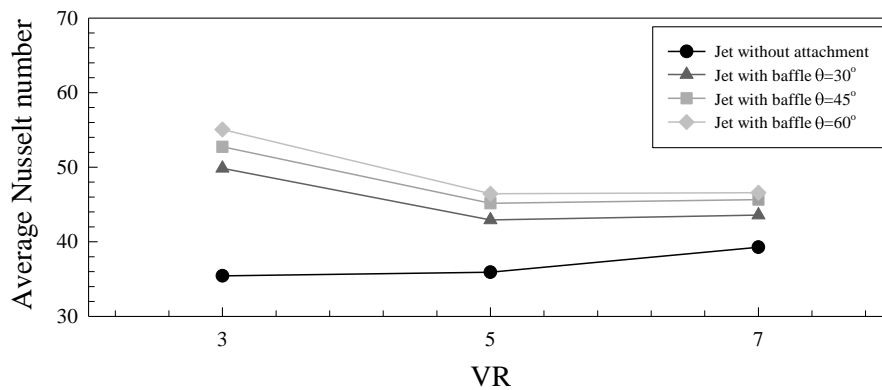


Fig. 14 Overall average Nusselt number for the case of a plain surface (with no impinging jets and baffle attachment), surface with baffle attachment (with no impinging jets) and surface with both impinging jets and baffle attachment (experimental results, $T_j=27.6^\circ\text{C}$)

5. CONCLUSIONS

In this study, flow and heat transfer characteristics for a row of impinging jets in cross-flow with baffle attachment in the upstream region of the impinging jets were investigated experimentally and numerically. The effect of the cross-flow velocity and the angle of attack of baffle arrangement were examined. The main conclusions can be drawn as follow:

1. The baffle attachment cannot reduce the effect of cross-flow on flow characteristics of impinging jets. The jet flow is more deflected to the downstream region when the cross-flow velocity is increased. The reattachment of cross-flow behind the baffle promotes the turbulence intensity in the upstream and downstream regions of the impinging jets.
2. Local Nusselt number distributions for the case of the baffle attachment are higher than the case with no baffle attachment. When the cross-flow velocity is increased, the heat transfer enhancement is more significant.
3. Local Nusselt number distributions for the case of baffle attachment with large angle of attack are larger than the case with a small angle of attack. This can be attributed to the fact that the large angle of attack is affecting the detachment and reattachment of flow from the baffle in a larger region than in the case of a small angle of attack.
4. Overall average Nusselt numbers for all case of baffle attachment are higher than the case of no baffle attachment. Especially for the angle of attack $\theta=60^\circ$, the overall average Nusselt number is higher than the case of no baffle attachment by about 55.3%, 29.3% and 18.6% for VR=3, 5 and 7, respectively.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by grants from the Graduate School and Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

NOMENCLATURE

A	heater surface area	(m ²)	VR	velocity ratio	(-)
D	jet diameter	(m)	X, Y, Z	Cartesian coordinates	(-)
e	baffle height	(m)	Greek symbols		
H	jet-to-surface distance	(m)	ε	emissive coefficient	
h	heat transfer coefficient	(W/m ² K)	σ	Stefan-Boltzman constant	(W/m ² K ⁴)
I	current	(A)	θ	intersection angle	($^\circ$)
k	thermal conductivity of jet	(W/m K)	Subscripts		
L	baffle-to-jet distance	(m)	c	convection	
l	length of baffle	(m)	input	input	
Nu	Nusselt number	(-)	j	jet	
p	baffle pitch	(m)	r	radiation	
\dot{q}	heat flux	(W/m ²)	s	surrounding	
Re	jet Reynolds number	(-)	w	wall	
S	jet-to-jet distance	(m)			
T	temperature	($^\circ$ C)			
t	thickness of baffle	(m)			

REFERENCES

- [1] Viskanta, R., "Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, pp.111-134, (1993).
- [2] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., "Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 23, pp.155-162, (1996).
- [3] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., Whitney, C.F., "Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 14, pp.60-67, (1997).
- [4] Katti, V., Prabhu, S.V., "Influence of spanwise pitch local heat transfer distribution for in-line arrays of circular jets with air flow in two opposite," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 33, pp.84-95, (2008).
- [5] Wae-hayee, M., Tekasakul, P., Nuntadusi t, C., "Influence of nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets," *Songklanakar J. Sci. Technol.*, 32, pp.203-212, (2013).
- [6] Rhee, D.-H., Yoon, P.-H., Cho, H.H., "Local heat/mass transfer and flow characteristics of array impinging jets with effusion holes ejecting spent air," *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 46, pp.1049-1061, (2003).
- [7] Hoberg, T.B., Onstad, A.J., Eaton, J.K., "Heat transfer measurements for jet impingement arrays with local extraction," *Int. J. Heat Fluid Flow*, 31, pp.406-467, (2010).
- [8] Nuntadusit, C., Wae-hayee, M., Tekasakul, P., Eiamsa-ard, S., "Local Heat Transfer Characteristics of Array Impinging Jets from Elongated Orifices," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 39, pp.1154-1164, (2012).
- [9] Caliskana, S., Baskayab, S., "Experimental investigation of impinging jet array heat transfer from a surface with V-shaped and convergent-divergent ribs," *Int. J. Therm. Sci.*, 59, pp.234-246, (2012)
- [10] Zuckerman, N., Lior, N., "Jet impingement heat transfer: physics, correlations, Numerical modeling," *Advances in Heat Transfer*, 39, pp.565-631, (2006).
- [11] Heo, M.W., Lee, K. D., Kim, K.Y., "Optimization of an inclined elliptic impinging jet with cross flow for enhancing heat transfer," *Heat Mass Transfer*, 47, pp.731-742, (2011).
- [12] Chandratilleke, T.T., Jagannatha, D., Narayanaswamy, R., "Heat transfer enhancement in microchannels with cross-flow synthetic jets," *Int. J. Thermal Sciences*, 49, pp.504-513, (2010).

ภาคผนวก ค.

บทความสำหรับเผยแพร่ 3

**“Heat Transfer Enhancement of Impinging Row Jets in Cross-flow with
Mounting Baffles on Surface”**

The 5th KKU International Engineering Conference 2014

Heat Transfer Enhancement of Impinging Row Jets in Cross-flow with Mounting Baffles on Surface

Rattanakorn Pansang^{1,a}, Makatar Wae-hayee^{1,b}, Passakorn Vessakosol^{1,c}
and Chayut Nuntadusit^{1,*d}

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

^agot1441@hotmail.com, ^bwaehayee@gmail.com, ^cvpassakorn@eng.psu.ac.th,
^dchayut@me.psu.ac.th

Keywords: Row of impinging jets, Cross-flow, Heat transfer enhancement, Baffles

Abstract

The aim of this research is to enhance heat transfer on a surface of row of impinging jets in cross-flow by mounting some baffles on the surface. A row of 4 jets with inline arrangement discharging from round orifices impinged normally on inner surface of wind tunnel with simulated cross-flow. The orifice diameter (D) was 13.2 mm. The jet-to-surface distance and jet-to-jet distance were fixed at $H=2D$ and $S=3D$, respectively. Four couples of baffles with V-shaped arrangement at attack angle, $\theta=30^\circ$, were mounted on surface in upstream or downstream of impinging jets and the location of baffles attachment is $L=1.5D$ apart from the jet impingement region. The velocity ratios (Jet velocity/cross-flow velocity) were varied from $VR=3, 5$ and 7 while the jet velocity was kept constant corresponding to $Re=13,400$. The experimental investigation was carried out for heat transfer characteristic by using Thermochromic Liquid Crystal sheet, and heat transfer coefficient distributions were evaluated using an image processing method. The results show that the impinging jets with mounting the baffles in the upstream region of jet impingement region can enhance the heat transfer rate throughout VR .

Introduction

Impinging jet is widely employed in many thermal industrial applications, such as cooling in gas turbine components and electronic device, because the heat transfer rate under impingement region is high. To obtain uniform heat transfer rate in a large area, multiple impinging jets are usually applied. For multiple impinging jets in a confined space, cross-flow occurs from accumulation of spent fluid or impinged jet in upstream region. Downstream jets, subsequently, interact with cross-flow resulting decreasing its momentum before impingement on surface and decreasing its heat transfer rate [1, 2].

To minimize the cross-flow effect in confined channel, the jet impinged wall was drilled with some effusion holes [3, 4]. Elongated orifices were replaced to conventional round orifices to reduce attacking area on jet and cross-flow [5, 6, 7]. Mounting baffle on a heat transfer surface associated with impinging jet under cross-flow was studied to enhance its heat transfer rate [8]; however, the effect of cross-flow velocity on heat transfer characteristics of impinging jets with baffles mounting is still unclear.

In this work, the heat transfer characteristics of a row of impinging jets with mounting baffle on a heat transfer surface was investigated at different cross-flow velocity. The effects of position of mounting baffles in upstream or downstream region of the impinging jets were also examined. In order to evaluate the heat transfer distribution on the impingement surface, Thermochromic Liquid Crystal (TLC) sheet was used to measure temperature distributions on the surface.

Experimental model and parameters

Figure 1 shows the detailed experimental model used in this study. The experiment was conducted in a wind tunnel with rectangular cross section. A row of 4 jets were discharged from round orifices with inline arrangement and impinged on an inner surface of rectangular wind tunnel. The orifice diameter (D) was 13.2 mm, and a jet-to-surface distance (H) and a jet-to-jet distance (S) were $H=2D$ and $S=3D$, respectively. The velocity ratios (jet velocity/cross-flow velocity) were varied from $VR=3, 5$ and 7 while the jet velocity was kept constant corresponding to $Re=13,400$. The baffles were made of acrylic plate with 3 mm in thickness, 5 mm in height and 10 mm in length. Four couples of baffles with V-shaped arrangement at attack angle, $\theta=30^\circ$ were mounted on impingement surface in upstream or downstream apart from the impingement region of each jet at $L=1.5D$.

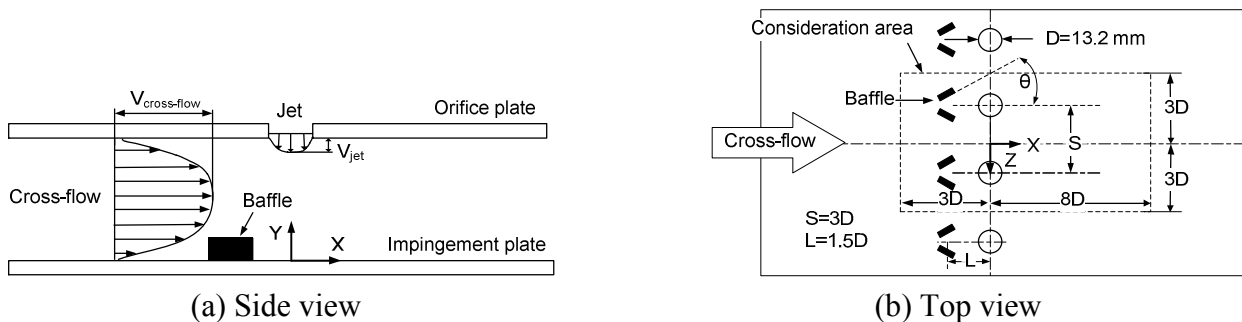


Fig.1 Experimental model of row of impinging jets with mounted baffles

Experimental setup and methods

Experimental setup. The schematic of the experimental setup is shown in Fig. 2. The impinging jets were generated with blower by introducing air through a temperature controlled chamber, a calibrated orifice flow meter, a jet chamber and a jet orifice before entering the test section. The simulated cross-flow was sucked from the inlet chamber through the wind tunnel by another blower. The cross-section of wind tunnel was rectangular with height of 26.4 mm ($H=2D$) and width of 300 mm. The length of calming section of wind tunnel was 200 cm which was sufficient to achieve fully developed flow before entering to the test section. A Pitot-static tube was located upstream of the test section to measure cross-flow velocity. For all experiments, the inlet temperatures of impinging jets and cross-flow were kept constant at 27.6°C . More details of experimental setup have been discussed in previous study [8].

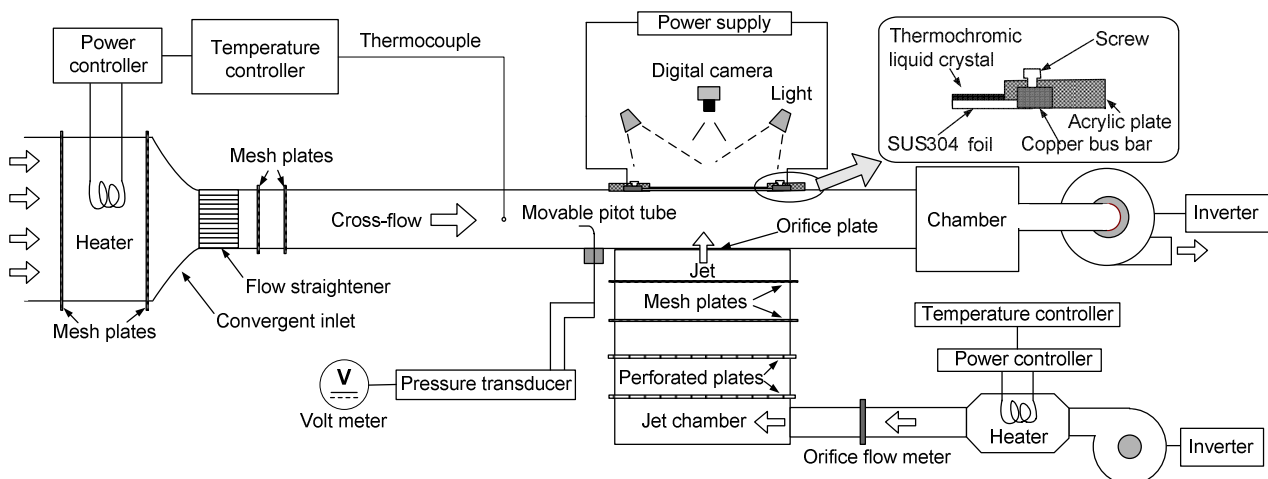


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

Heat transfer measurement. The wall temperature on the impingement surface was measured by using TLC sheet that attached on the rear side of jet impinged surface as shown in Fig. 2. The heat transfer surface was made of stainless steel foil which having thickness of 30 μm and was installed between a pair of copper bus bars. The heat transfer surface was heated by DC power supply through copper bus bars. An electrical energy dissipated in the stainless steel foil can be determined from

$$\dot{q}_{input} = \frac{I^2 \cdot R}{A}, \quad (1)$$

where, I is the electrical current, R and A are the electrical resistance and the area of the stainless steel foil.

The jets impinged on the heated wall within cross-flow for cooling. The local heat transfer coefficient by forced convection of the impinging jets, h , can be evaluated from

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_r - \dot{q}_c}{T_w - T_j}, \quad (2)$$

where, \dot{q}_r and \dot{q}_c are the heat losses to the environment by radiation and convection from rear side of impinged surface, respectively; T_w and T_j are the wall temperature measured with TLC sheet and jet temperatures measured in jet chamber. The CCD camera was used to capture color patterns on TLC sheet, and the color patterns were subsequently converted to their temperature distributions in range of 28-40°C via a calibration curve. The local Nusselt number was calculated

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

here, D is the diameter of the orifice and k is a thermal conductivity of an air jet.

Results and discussion

Nusselt number distributions on impingement surface are shown in Fig. 3, and it was also shown the overall average Nusselt number (\overline{Nu}) that calculated from the overall average temperature on the impingement surface. Generally, the Nusselt number is high in impingement region and low in upstream region due to cross-flow effect. The regions of high Nusselt number decrease rapidly along upstream region (X minus direction) and decrease gradually along downstream region (X plus direction). In addition, the areas of high Nusselt number are found in region behind mounting baffle.

The extension areas of high Nusselt number behind the baffles for mounting in upstream region are larger than the others under the same VR. Especially for the case of high crossflow velocity, VR=3 as shown in Fig. 3(f), the Nusselt number distributions in upstream region are higher than those without mounting baffles as shown in Fig. 3(c) and with mounting baffles in downstream region as shown in Fig. 3(i).

The Nusselt number distributions in impingement region for the case of baffle mounting in downstream region are lower than the others at the same VR. This can be explained that the jets on impinged surface were blocked by the mounting baffles in downstream and mixed strongly with cross-flow. This is contrast to the case of baffle mounting in the upstream region. The heat transfer in upstream region of jet impingement become higher due to effect of baffle mounting. The baffle mounting in downstream region can promote the local Nusselt number in region behind the baffles.

The overall average Nusselt number shows the case of baffle mounting in upstream region are higher than the others throughout VR. It can be noted that these average values are higher than the conventional case (without baffles) of 2%, 6.82% and 20% for VR=7, 5 and 3, respectively.

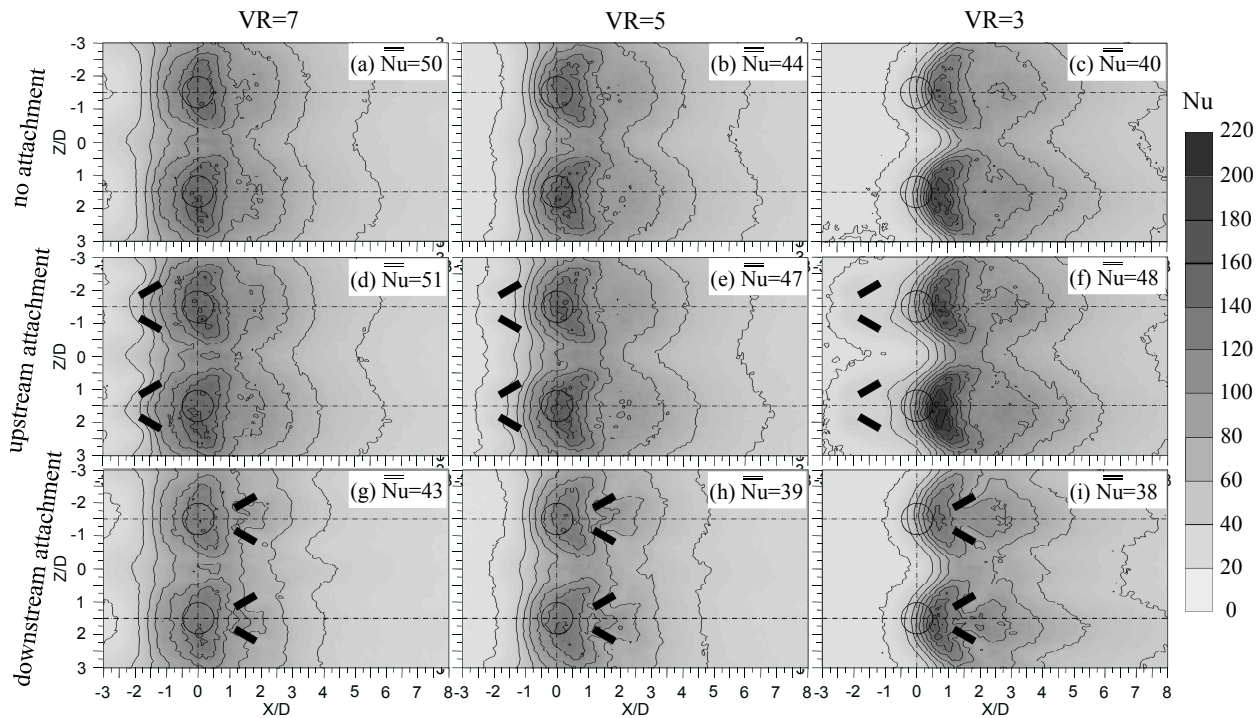


Fig. 3 Nusselt number distributions on the impinged surface ($T_j=27.6\text{ }^\circ\text{C}$, $Re_j=13,400$, \overline{Nu} : overall average Nusselt number)

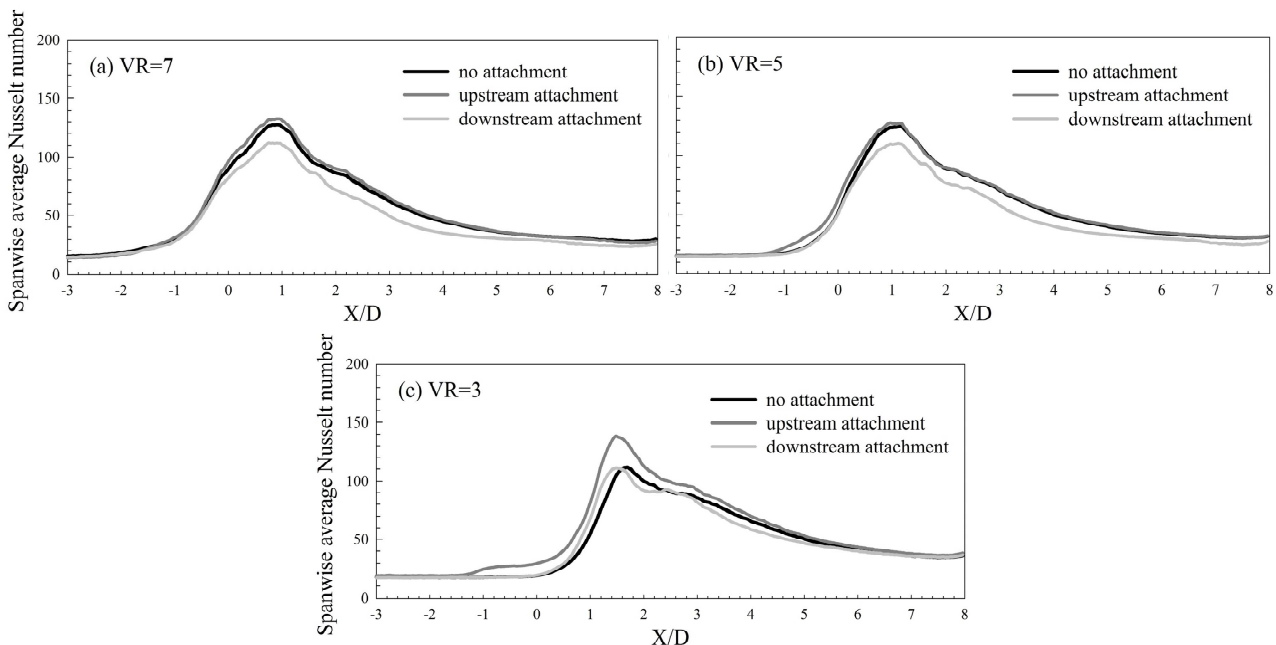


Fig. 4 Spanwise average Nusselt number distributions ($T_j=27.6\text{ }^\circ\text{C}$, $Re_j=13,400$)

The distributions of spanwise average Nusselt number that calculated from the average temperature in spanwise region in the range of $-3 \leq Z/D \leq 3$ are shown in Fig. 4. The distributions are decreased more rapid in upstream region and the peaks of average values were shifted to downstream region when crossflow velocity increases. This is due to the strong interaction with cross-flow in upstream region [8]. The peaks of average values for the case of baffle mounting in in

upstream region are higher than the others at the same VR, and the peak of this case is the highest at VR=3 as shown in Fig. 4(c).

In addition for the case of high cross-flow velocity as shown in Fig. 4(c), the average values of baffle mounting in upstream region are apparently higher than the others. The apparent high average value of this case starts from $X/D \approx 1.5$. This location is identical to the location of baffle mounting at upstream region. It should be noted that the effect of baffle mounting in upstream region for the case of high cross-flow velocity, VR=3, can increase local heat transfer more than the case of low and moderate cross-flow velocity, VR=7 and 5.

Conclusion

The major findings for the present work can be summarized as follows:

1. The heat transfer rates of the impingement jet with mounting the baffles in the upstream region are higher than that in the downstream one.
2. The overall average Nusselt number for the case of mounting baffle in upstream region is higher than the conventional case (without baffles) of 2%, 6.82% and 20% for VR=7, 5 and 3, respectively.
3. The effect of baffles mounting in upstream region for heat transfer enhancement for the case of high cross-flow velocity, VR=3, is stronger than those the case of low and moderate cross-flow velocity, VR=7 and 5.

Acknowledgments

This research was supported by Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

References

- [1] R. Viskanta, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 6 (1993) 111-134.
- [2] R. J. Goldstein, and I. Behbahan, Impingement of a Circular Jet with and without Cross Flow, *Int. J. Heat Mass Transfer.* 25 (1982) 1377-1382.
- [3] D.-H. Rhee, P.-H. Yoon, H.H. Cho, Local heat/mass transfer and flow characteristics of array impinging jets with effusion holes ejecting spent air, *Int. J. Heat Mass Transfer.* 46 (2003) 1049-1061.
- [4] T.B. Hoberg, A.J. Onstad, J.K. Eaton, Heat transfer measurements for jet impingement arrays with local extraction, *Int. J. Heat Fluid Flow.* 31 (2010) 406-467.
- [5] C. Nuntadusit, M. Wae-hayee, P. Tekasakul and S. Eiamsa-ard, Local Heat Transfer Characteristics of Array Impinging Jets from Elongated Orifices, *Int. Commun. Heat Mass Transfer.* 39. (2012) 1154-1164.
- [6] C. Nuntadusit, M. Wae-hayee, Flow and Heat Transfer Characteristics of Row of Jet Impingement from Elongated Orifice under Cross-flow, *The 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2013)*, Nagoya, Japan, 2013.
- [7] M. Wae-hayee, P. Tekasakul, C. Nuntadusit, Influence of nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets, *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 32 (2013) 203-212.
- [8] S. Caliskana, and S. Baskayab, Experimental investigation of impinging jet array heat transfer from a surface with V-shaped and convergent-divergent ribs, *Int. J. Therm. Sci.* 59 (2012) 234-246.

ภาคผนวก ง.

การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

ภาคผนวก ง.

การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

การคำนวณนัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (จ.1)$$

จากสมการนัสเซลต์นัมเบอร์สามารถนำมาเขียนแยกเป็นสมการย่อยได้ดังนี้

$$Nu = \frac{\dot{q}_{input} D}{(T_w - T_j) k} \quad (จ.2)$$

$$Nu = \frac{I^2 R D}{A k (T_w - T_j)} \quad (จ.3)$$

$$Nu = I^2 \cdot R \cdot D \cdot k^{-1} \cdot A^{-1} \cdot (T_w - T_j)^{-1} \quad (จ.4)$$

เมื่อ	D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ริฟิส, m
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส, A
	R	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส, Ω
	A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน, m^2
	T_w	คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมคอปิลคิตคริสตัล, $^{\circ}C$
	T_j	คือ อุณหภูมิของเจ็ท, $^{\circ}C$
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเจ็ท, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$

ง.1. การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Analysis)

ง.1.1. ค่าความไม่แน่นอนของกระแสไฟฟ้า

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของกระแสไฟฟ้าใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(Nu)}{dI} = \frac{2I \cdot R \cdot D}{kA(T_w - T_j)} \quad (จ.5)$$

ง.1.2. ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลส

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสแตนเลสใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(\text{Nu})}{dR} = \frac{I^2 \cdot D}{kA(T_w - T_j)} \quad (\text{จ.6})$$

ง.1.3. ค่าความไม่แน่นอนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ริฟิส

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออร์ริฟิสใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(\text{Nu})}{dD} = \frac{(I^2)(R)}{kA(T_w - T_j)} \quad (\text{จ.6})$$

ง.1.4. ค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(\text{Nu})}{dk} = I^2 \cdot R \cdot D \cdot (-1)k^{-2} \cdot A^{-1} \cdot (T_w - T_j)^{-1} \quad (\text{จ.7})$$

$$\frac{d(\text{Nu})}{dk} = \frac{-I^2 \cdot R \cdot D}{k^2 \cdot A \cdot (T_w - T_j)} \quad (\text{จ.8})$$

ง.1.5. ค่าความไม่แน่นอนของพื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของพื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(\text{Nu})}{dA} = I^2 \cdot R \cdot D \cdot k^{-1} \cdot (-1)A^{-2} \cdot (T_w - T_j)^{-1} \quad (\text{จ.9})$$

$$\frac{d(\text{Nu})}{dA} = \frac{-I^2 \cdot R \cdot D}{k \cdot A^2 \cdot (T_w - T_j)} \quad (\text{จ.10})$$

ง.1.6. ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัล

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิบนพื้นผิวที่วัดจากแผ่นเทอร์โมโครมิคลิควิดคริสตัลใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(\text{Nu})}{dT_w} = I^2 \cdot R \cdot D \cdot k^{-1} \cdot A^{-1} \cdot (-1)(T_w - T_j)^{-2} \quad (\text{จ.11})$$

$$\frac{d(\text{Nu})}{dT_w} = \frac{-I^2 \cdot R \cdot D}{k \cdot A \cdot (T_w - T_j)^2} \quad (\text{จ.12})$$

ง.1.7. ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิของเจ็ท

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิของเจ็ทใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{d(\text{Nu})}{dT_j} = I^2 \cdot R \cdot D \cdot k^{-1} \cdot A^{-1} \cdot (-1)(T_w - T_j)^{-2}(-1) \quad (\text{จ.13})$$

$$\frac{d(\text{Nu})}{dT_j} = \frac{I^2 \cdot R \cdot D}{k \cdot A \cdot (T_w - T_j)^2} \quad (\text{จ.14})$$

ง.2. การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของนัสเซลต์นัมเบอร์

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของนัสเซลต์นัมเบอร์ (Nusselt Number) ทำได้โดยการรวมค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรทุกตัวเข้าด้วยกัน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Nu} = \frac{d(\text{Nu})}{dI} + \frac{d(\text{Nu})}{dR} + \frac{d(\text{Nu})}{dD} + \frac{d(\text{Nu})}{dk} + \frac{d(\text{Nu})}{dA} + \frac{d(\text{Nu})}{dT_w} + \frac{d(\text{Nu})}{dT_j} \quad (\text{จ.15})$$