



การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม
ที่มีการปรับแต่งปากทางออก

**Heat Transfer Augmentation for Impinging Jet from Slot Nozzle
with Outlet Modifications**

อภิชาติ ศรีไชยรัตนา

Apichit Srichairattana

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**

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพวงชนจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีการ
ปรับแต่งปากทางออก

ผู้เขียน นายอภิชาติ ศรีไชยรัตนา

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

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

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

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

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

.....กรรมการ
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

.....กรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือ

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุณิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายอภิชาติ ศรีไชยรัตนา)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอภิชาติ ศรีไชยรัตนา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีการปรับแต่งปากทางออก
ผู้เขียน	นายอภิชาติ ศรีไชยรัตนา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อปากทางออกหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแท่งทรงกระบอกขวางการไหลและแผ่นซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกเจ็ท เพื่อเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน และศึกษาปากทางออกแบบปรกติเพื่อเปรียบเทียบ โดยปากทางออกของเจ็ทแต่ละแบบกำหนดให้ความกว้างของปากทางออกเจ็ทคงที่ ($W=40$ mm) และพื้นที่ปากทางออกของเจ็ทเท่ากันทุกกรณี

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งศึกษาสมบัติการไหลของเจ็ทอากาศอิสระโดยใช้หัววัดแบบลวดร้อนวัดการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ ส่วนที่สองศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared camera) วัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวและคำนวณการกระจายนั้สเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิว ส่วนที่สามศึกษาการไหลของเจ็ทอากาศที่พุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ (ANSYS Ver.13.0) เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยทุกกรณีกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทอากาศคงที่ $Re=15,000$ ส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนด้วยวิธีเชิงทัศน Laser Induced Fluorescence (LIF) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออกทั้ง 3 แบบ โดยกำหนดให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทน้ำคงที่ $Re=3,200$

จากผลการศึกษาพบว่า ลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทแบบปากทางออกสี่เหลี่ยมที่ติดตั้งอุปกรณ์ที่บริเวณปากทางออกสามารถดึงของไหลที่อยู่บริเวณรอบลำเจ็ทมาผสมกับลำเจ็ทได้ดีกว่ากรณีปากทางออกปรกติที่ระยะห่างจากปากทางออกต่ำทำให้ค่าความปั่นป่วนที่สูงโดยลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศอิสระตามแนวแกนเจ็ทจากผลของความเร็วของเจ็ทในแต่ละระยะห่างจากปากทางออก พบว่าโดยส่วนใหญ่ค่าความเร็วสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกบริเวณจุดกลางของลำเจ็ท และเมื่อระยะห่างในแนวแกนเจ็ทเพิ่มขึ้นค่าความเร็วสูงสุดจะมีค่าลดลง

เรื่อยๆแต่จะเปลี่ยนแปลงเป็นอัตราการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างของปากทางออกเจ็ท ยกเว้นกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ค่าความเร็วสูงสุดมีค่าที่ห่างออกมาจากตำแหน่งปากทางออกของเจ็ท ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดปรากฏการณ์ Vena contracta ทำให้ค่าความเร็วที่บริเวณปากทางออกต่ำ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลำเจ็ทไหลออกห่างจากบริเวณปากทางออกเจ็ท

การกระจายตัวของค่านัสเซลนัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยภาพรวมพบว่า มีค่าสูงสุดตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชน โดยตรงและลดลงตามแนวความกว้างของท่อเจ็ท และในส่วนของค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ย พบว่ากรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอก ค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2W$ แต่เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้นค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าที่ลดลง ส่วนกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยค่านัสเซลนัมเบอร์จะมีค่าที่ระยะห่างจากปากทางออกน้อยและมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ระยะห่าง $H=4W$ นั้นมีค่าสูงเกิดจากปรากฏการณ์ Vena contracta โดยความเร็วของเจ็ทกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยมีค่าสูงที่บริเวณนี้ และในกรณีปากทางออกปรกติค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าสูงสุดที่ระยะ $H=8W$ โดยที่ระยะ $H<8W$ ค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยมีค่าที่ต่ำลงโดยจากการทดลองค่านัสเซลนัมเบอร์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่กรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2W$

การศึกษาการไหลของเจ็ทอากาศที่พุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ (ANSYS Ver.13.0) เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน กรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอกพบว่าค่าความเร็วที่ด้านหลังแท่งทรงกระบอกมีค่าที่ต่ำกว่าแบบอื่นเนื่องจากเกิด wake ที่ด้านหลังแท่งทรงกระบอก ในกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยพบว่าค่าความปั่นป่วนจะมีค่าที่สูงกว่าปากทางออกแบบอื่นตั้งแต่ระยะ $H=4W$ เป็นต้นไปเนื่องจากการรบกวนของ Shear layer ที่เกิดจากการไหลผ่านซี่ฟันเลื่อยส่งผลให้มีค่าความปั่นป่วนที่สูง และในกรณีปากทางออกปรกติพบว่าในทุกระยะห่างจากปากทางออกในบริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ทยังไม่เกิดความปั่นป่วนซึ่งแตกต่างจากกรณีอื่น

การศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีเชิงทัศนด้วยวิธี Laser Induced Fluorescence (LIF) จากการศึกษาพบว่ากรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอกจะเกิด wake ก่อนการพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดการผสมกันของลำเจ็ทและน้ำบริเวณรอบที่สูงกว่ากรณีปากทางออกปรกติ และกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยพบว่าลำเจ็ทมีการขยายตัวที่น้อยเมื่อเทียบกับกรณีปากทางออกปรกติแต่เกิดการผสมกันของลำเจ็ทและน้ำบริเวณรอบที่ระยะน้อยกว่าปากทางออกปรกติ โดยที่การเกิดการผสมกันของลำเจ็ทและน้ำบริเวณรอบกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยเริ่มเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนที่ระยะ $H=2W$ แต่กรณีปากทางออกปรกติเริ่มเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนที่ระยะ $H=6W$

Thesis Title	Heat Transfer Augmentation for Impinging Jet from Slot Nozzle with Outlet Modifications
Author	Mr. Apichit Srichairattana
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2014

ABSTRACT

The aim of this research is to study flow and heat transfer characteristics of impinging jet normal to the surface. From slot nozzle with outlet modifications for increase the heat transfer by comparison with normal outlet. The equipment installation at the outlet jet divided into 2 types. Are the outlet installation cylinder rod and the outlet installation tab. Slot jet perpendicular to the surface jet impinging. Where fix width of the outlet jet ($W=40\text{mm}$) and the area outlet jet the same in all cases.

The experiment was divided into 4 parts. The first case study free jet flow by using Hot-wire probe for collect data distribution of the velocity and turbulence of free jet. And part 2 case flow and heat transfer on the surface of slot nozzle jet impinging normal to the surface. By using infrared cameras for measurements temperature distribution and analysis distribution Nusselt number on the surface. Part 3 flow simulation using computational fluids dynamics software (ANSYS Ver.13.0) for study of heat transfer characteristics on impinging surface. In all cases Reynolds number was fix at 15,000. And finally part the flow characteristics of jet impinging on the surface were study by using Laser Induced Fluorescence (LIF).For compare structural characteristics flow of jet impinging on the surface from 3 types of outlet slot jet.(Reynolds number was fix at 3,200)

The results of study. The structure of flow from slot nozzle with outlet modifications. Can pull fluid around area jet to mix with jet better than the normal outlet. At low jet-to-plate distance causing the high turbulence. The flow characteristics of free jet along the axis of the jet. The result velocity of jet from each jet-to-plate distance. Found that most of the top velocity is near the outlet around the mid-point of a jet flow. When the jet-to-plate distance in the axial jet increases the velocity will be reduce but that will change as the rate of expansion of free

jet in direction across the width jet. Except for case tab installation at outlet slot jet. At near outlet jet velocity is low caused Vena contracta phenomenon and velocity will increase when jet-to-plate distance increasing

The overall finds distribution of the Nusselt number on the surface from jet impinging are highest position of the jet directly impinging and dropped in direction across the width jet. And the average Nusselt number case cylinder rod installation the highest average Nusselt number at jet-to-plate distance $2W$. However, when jet-to-plate distance increase the average Nusselt number is declining. Case Tab installation at low jet-to-plate distance the average Nusselt number is poor. And when increasing jet-to-plate distance the average Nusselt number is rise. At $H=4W$ high average Nusselt number caused Vena contracta phenomenon and this area velocity will increase. And foe case conventional slot high average Nusselt number at jet-to-plate distance since $8W$. When jet-to-plate less than $8W$ average Nusselt number is low. The experimental results The average Nusselt number case cylinder rod installation as jet-to-plate distance $2W$ highest more than all case.

A study of flow simulation using computational fluids dynamics software (ANSYS Ver.13.0) for study of heat transfer characteristics on impinging surface. Case cylinder rod installation found that the velocity at which the rear cylinder is lower than the other. Due to the wake behind the cylinder rod. Case Tab installation found the turbulence highest than other case at jet-to-plate distance since $4W$ due to the interference of Shear layer from Flow through Tab. And case normal outlet found that in all jet-to-plate distance in the center of jet has not caused the turbulence unlike other cases.

And the flow characteristics of jet impinging on the surface were study by using Laser Induced Fluorescence (LIF). For compare structural characteristics flow of jet impinging on the surface. Case cylinder rod installation found caused wake before jet impinging on the surface the combination of jet and water around the outlet is higher than normal outlet. And case Tab installation that is expanding at a minimum compared to the normal outlet. But the combination of jet and water around the outlet at a distance less than the normal outlet. By the combination of jet and water around the case Tab installation begin to occur significantly at the outlet $H = 2W$, but case normal outlet start to occur significantly at $H = 6W$.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุลิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่เสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยและเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขข้อมูลวิทยานิพนธ์จนมีความถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ และรองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรภายในภาค ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

อภิชาติ ศรีไชยรัตนา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(21)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม	8
2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน	9
2.3 การหมุนวน (Vortex)	10
2.4 ความปั่นป่วนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว	11
2.5 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	13
2.5.1 ชนิดของหัวฉีดเจ็ท	13
2.5.2 ระยะห่างจากปากหัวฉีดถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	14
2.6 การตรวจเอกสาร	16
2.6.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทพุ่งชน	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทพุ่งชน	19
2.7.1 เจ็ทเดี่ยวพุ่งชนแบบไหลต่อเนื่อง (Single steady jet impingement)	19
2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการติดตั้งอุปกรณ์ที่บริเวณปากทางออกเจ็ท	25
2.8 กรอบแนวคิดในการวิจัย	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	31
3.1 การออกแบบและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	31
3.2 ระบบพิกัดที่ใช้อ้างอิงและรูปแบบปากทางออก	32
3.3 การศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	34
3.3.1 อุปกรณ์ของชุดทดลอง	34
3.3.2 วิธีการทดลอง	36
3.3.3 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลปะทะด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางความร้อน	40
3.2.4 การสอบเทียบกล้องอินฟราเรด	42
3.4 การศึกษาลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ	44
3.4.1 รายละเอียดชุดทดลอง	44
3.4.2 การสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	46
3.4.3 วิธีการทดลอง	48
3.5 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน	49
3.5.1 ชุดทดลอง	50
3.5.2 วิธีการทดลอง	51
บทที่ 4 การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	52
4.1 ทฤษฎีของการคำนวณพลศาสตร์ของไหล	52
4.1.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์	52
4.1.2 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	54
4.1.3 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulence model)	55
4.2 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล	64
4.3 ขั้นตอนการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	64
4.3.1 การสร้างกริด (Meshing)	65
4.3.2 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ (Boundary condition)	67
4.3.3 การคำนวณ	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการศึกษา	70
5.1 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระ	70
5.1.1 การศึกษาลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วน ของเจ็ทอิสระ	70
5.1.2 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของ ลำเจ็ทอากาศอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z)	75
5.1.3 การขยายตัวของเจ็ทอากาศอิสระตามแนวความกว้างต่อเจ็ท ในทิศทางแนวแกนเจ็ท (Z)	82
5.2 การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	84
5.2.1 การศึกษาลักษณะการกระจายของน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว ที่เจ็ทพุ่งชน	84
5.2.2 การเปรียบเทียบการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยตามแนวแกน X ผ่านจุดศูนย์กลางบนพื้นผิว	86
5.2.3 การศึกษาการเปรียบเทียบน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย ทั้งพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	88
5.3 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวิธี CFD	91
5.4 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF)	101
5.4.1 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศน เปรียบเทียบกับผลการขยายตัวเจ็ทอากาศตามแนวแกนเจ็ท	106
5.4.2 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศน เปรียบเทียบกับผลถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	109
5.4.1 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพัฒนาตัวขณะพุ่งชนพื้นผิวโดย วิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบกับผลการศึกษาลักษณะการไหล ของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวิธี CFD (Steam line)	113
บทที่ 6 สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	117
6.1 สรุปผลการวิจัย	117
6.2 ข้อเสนอแนะ	119

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	120
ภาคผนวก ก. บทความสำหรับเผยแพร่ 1	122
ภาคผนวก ข. บทความสำหรับเผยแพร่ 2	128
ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 3	136
ประวัติผู้เขียน	142

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลอง	24
ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	34
ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ	50
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulence model) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาเจ็ทพุงชนพื้นผิว	57
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสามแบบ	63
ตารางที่ 4.3 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization	69

รายการภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน	1
รูปที่ 1.2 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วิธีเจ็ทพุ่งชน	2
รูปที่ 1.3 แสดงถึงลักษณะการใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชน	3
รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลเจ็ทที่มีพลังงานภายนอกกระตุ้น	4
รูปที่ 1.5 แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลเจ็ทที่ไม่มีพลังงานภายนอกกระตุ้น	5
รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระแบบสี่เหลี่ยม	9
รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ	10
รูปที่ 2.3 ลักษณะการสั้นของรอยต่อระหว่างชั้นอากาศที่เนียนกัน	11
รูปที่ 2.4 ลักษณะความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระที่เกิดจากการไหลที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สูง	12
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว	13
รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนที่ปากทางออกหัวฉีด	14
รูปที่ 2.7 การกระจายนัสเซิลด์นัมเบอร์ตามแนวรัศมีที่ระยะปากทางออกของเจ็ท ถึงพื้นผิวที่ระยะพุ่งชนต่างๆ ($Re = 23,750$)	15
รูปที่ 2.8 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเจ็ทน้ำปะทะโดยตรง	16
รูปที่ 2.9 เตาอบความเร็วสูงโดยใช้เจ็ทอากาศร้อนไหลปะทะ	17
รูปที่ 2.10 เจ็ทอากาศพุ่งชนเพื่อระบายความร้อนชุดสะสมพลังงานแสงอาทิตย์	17
รูปที่ 2.11 เตาอบสายพานลาเตียงแบบเจ็ทคู่ไหลปะทะ	18
รูปที่ 2.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจ็ทพุ่งชน	19
รูปที่ 2.13 การกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	20
รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของความปั่นป่วนในแนวแกนเจ็ท	20
รูปที่ 2.15 ความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทในทิศทางแนวแกนเจ็ท บริเวณจุดกลางท่อเจ็ท	21
รูปที่ 2.16 แสดงวิวัฒนาการของเจ็ทแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่บริเวณต่างๆ	22
รูปที่ 2.17 ถ่ายภาพโครงสร้างของการไหลด้วยการถ่ายภาพอนุภาคเคลื่อนที่ (PIV)	22
รูปที่ 2.18 ความเร็วของลำเจ็ทที่แต่ละตำแหน่งจากภาพอนุภาคเคลื่อนที่ (PIV) และการวัดด้วย Hot Film Anemometer	23
รูปที่ 2.19 แสดงท่อเจ็ทแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง	24
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการติดแผ่น Tab รูปร่างสามเหลี่ยมที่ปากทางออกเจ็ท	25

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ปากทางออกเจ็ท	26
รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการติดตั้ง Tabs สามเหลี่ยมที่ปากทางออกเจ็ททั้งสามแบบ	26
รูปที่ 2.23 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวรัศมีเจ็ท	27
รูปที่ 2.24 แสดงแผนภาพของปากทางออกที่มีการติดตั้ง tabs	28
รูปที่ 2.25 แสดงผลจากการทดลองทั้ง 3 กรณีที่ระยะ $x/DH = 1.75$	28
รูปที่ 2.26 แสดงผลความเร็วจากการทดลองทั้ง 3 กรณี	29
รูปที่ 2.28 แสดงรูปแบบความเร็วของ streamwise ที่ระยะห่างด้านหลังแท่งทรงกระบอก แต่ละตำแหน่ง	29
รูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบชุดทดลองและระบบพิกัดที่ใช้ในการศึกษา	32
รูปที่ 3.2 รูปแบบปากทางออกเจ็ทกรณีเจ็ททอแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอก	33
รูปที่ 3.3 รูปแบบปากทางออกเจ็ทกรณีทอแบบปากทางออกปรกติ	33
รูปที่ 3.4 รูปแบบปากทางออกเจ็ทกรณีเจ็ททอแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อย	33
รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะ ของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว	35
รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของผนังที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว	36
รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนที่ได้จากกล้องอินฟราเรดในกรณีที่มีการ จ่ายฟลักซ์ความร้อนและกรณีไม่จ่ายฟลักซ์ที่ได้จากกล้องอินฟราเรด	41
รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการหาค่าการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่ง ชนโดยใช้การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB	41
รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองที่ใช้ในสอบเทียบกล้องอินฟราเรด	42
รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องอินฟราเรดและเทอร์โมคัปเปิลแบบ PT-100	43
รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ	44
รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างระยะห่างในการติดตั้งหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	45
รูปที่ 3.13 แสดงอุปกรณ์หัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot wire probe)	45
รูปที่ 3.14 แสดงชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน	46
รูปที่ 3.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเจ็ทและแรงดันไฟฟ้า	47
รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ (Free jet)	48
รูปที่ 3.17 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF)	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.18 แสดงท่อปากทางออกหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีการปรับแต่งที่ปากทางออก ที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงฟังก์ชัน (LIF)	51
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน	54
รูปที่ 4.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล	64
รูปที่ 4.3 แสดงรายละเอียดคริตของแบบจำลองกรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออกปกติ	65
รูปที่ 4.4 แสดงรายละเอียดคริตของแบบจำลองกรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออก ติดตั้งแท่งทรงกระบอก	66
รูปที่ 4.5 แสดงรายละเอียดคริตของแบบจำลองกรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออก ติดตั้งซี่ฟันเลื่อย	66
รูปที่ 4.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล	67
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วของเจ็ทอิสระที่ตำแหน่งออกทางออก ระหว่างการทดลองและการจำลองการไหลทางพลศาสตร์ของของไหล	68
รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Y Plus ที่ความละเอียดของกริดแตกต่างกัน	69
รูปที่ 5.1 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ กรณีท่อแบบปกติ ($Re=15,000$, $V_0=11.7\text{m/s}$, $Z/W=0$)	71
รูปที่ 5.2 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ กรณีท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออก ($Re=15,000$, $V_0=13.6\text{m/s}$, $Z/W=0$)	71
รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ กรณีท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออก ($Re=15,000$, $V_0=12.9\text{m/s}$, $Z/W=0$)	72
รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ ($Re=15,000$)	73
รูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอากาศอิสระ ในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท	76
รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทาง ตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีท่อปากทางออกปกติที่ตำแหน่ง ($Y/W=0$)	78

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีท่อปากทางออกปรกติที่ตำแหน่ง ($Y/W=0.25$)	78
รูปที่ 5.8 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีท่อติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0$)	79
รูปที่ 5.9 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีท่อติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0.25$)	79
รูปที่ 5.10 การกระจายความเร็วของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท(Z) กรณีท่อติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0$)	80
รูปที่ 5.11 การกระจายความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท(Z) กรณีท่อติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0$)	80
รูปที่ 5.12 การกระจายความเร็วของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท(Z) กรณีท่อติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0.25$)	81
รูปที่ 5.13 การกระจายความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท(Z) กรณีท่อติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0.25$)	81
รูปที่ 5.14 แสดงระยะความกว้างของลำเจ็ทในแนวแกน Y ($Y_{0.5}$)	82
รูปที่ 5.15 แสดงการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างต่อเจ็ทเปรียบเทียบระหว่างเจ็ทปากทางออกปรกติกับปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอก	83
รูปที่ 5.16 แสดงการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างต่อเจ็ทเปรียบเทียบระหว่างเจ็ทปากทางออกปรกติกับปากทางออกติดตั้งแท่งซี่ฟันเลื่อย	83
รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชน ($Re=15,000$)	85
รูปที่ 5.18 การกระจายนัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทอากาศพุ่งชนในแนวแกน X ($Re=15,000$)	87
รูปที่ 5.19 แสดงบริเวณการเปรียบเทียบนัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	88
รูปที่ 5.20 แสดงการกระจายนัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชน บริเวณ $-0.75 \leq X/W \leq 0.75$ และ $-3 \leq Y/W \leq 3$ ($Re=15,000$)	89

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.21 แสดงโมเดลจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว	91
รูปที่ 5.22 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศพุ่งชน กรณีท่อแบบปรกติ (ผลจากการจำลองลักษณะการไหล $Re=15,000$)	92
รูปที่ 5.23 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศพุ่งชน กรณีท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออก (ผลจากการจำลองลักษณะการไหล $Re=15,000$)	93
รูปที่ 5.24 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศพุ่งชน กรณีท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออก (ผลจากการจำลองลักษณะการไหล $Re=15,000$)	93
รูปที่ 5.25 การกระจายความดันบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางของเจ็ทอากาศพุ่งชน (ผลจากการจำลองลักษณะการไหล $Re=15,000$)	94
รูปที่ 5.26 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิวแบบ Contour ของความเร็วในระนาบ YZ ที่ตำแหน่ง $X=0$ ($Re=15,000$)	96
รูปที่ 5.27 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิวแบบ Contour ของพลังงานเชิงจลน์แบบปั่นป่วนในระนาบ YZ ที่ตำแหน่ง $X=0$ ($Re=15,000$)	97
รูปที่ 5.28 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิวแบบ Contour ของความเร็วในระนาบ YZ ที่ตำแหน่ง $X=-0.25$ ($Re=15,000$)	99
รูปที่ 5.29 แสดงผลการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิวแบบ Contour ของพลังงานเชิงจลน์แบบปั่นป่วนในระนาบ YZ ที่ตำแหน่ง $X=-0.25$ ($Re=15,000$)	100
รูปที่ 5.30 แสดงลักษณะของเจ็ทน้ำก่อนพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศน (LIF) กรณีเจ็ทปากทางออกต่างๆ ($Re=3,200$)	102
รูปที่ 5.31 แสดงผลลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศน (LIF) กรณีเจ็ทปากทางออกต่างๆ ($Re=3,200$)	104
รูปที่ 5.32 แสดงผลลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพัฒนาตัวขณะพุ่งชนพื้นผิว โดยวิธีเชิงทัศน (LIF) กรณีเจ็ทปากทางออกต่างๆ ($Re=3,200$)	105

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.33 แสดงการเปรียบเทียบเจ็ทน้ำกับการขยายตัวเจ็ทอากาศตามแนวแกนเจ็ท กรณีท่อปากทางออกปรกติและปากทางออกติดตั้งห่างทรงกระบอก	107
รูปที่ 5.34 แสดงการเปรียบเทียบการขยายตัวเจ็ทอากาศตามแนวแกนเจ็ทกับเจ็ทน้ำ กรณีท่อปากทางออกปรกติและปากทางออกติดตั้งชี้พื้นเอียง	108
รูปที่ 5.35 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบ กับผลถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่ง $H=2W$	109
รูปที่ 5.36 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบ กับผลถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่ง $H=4W$	110
รูปที่ 5.37 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบ กับผลถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่ง $H=6W$	111
รูปที่ 5.38 แสดงลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบ กับผลถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ตำแหน่ง $H=8W$	112
รูปที่ 5.39 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบ กับลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวิธี CFD (Steam line) กรณีปากทางออกปรกติ	113
รูปที่ 5.40 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบ กับลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวิธี CFD (Steam line) กรณีปากทางออกติดตั้งห่างทรงกระบอก	114
รูปที่ 5.41 ลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำขณะพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนเปรียบเทียบ กับลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวโดยวิธี CFD (Steam line) กรณีปากทางออกติดตั้งชี้พื้นเอียง	115

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์คำย่อ		หน่วย
A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	m ²
B	คือ ความกว้างของหัวฉีดแบบสล็อต	m
c _p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	kJ/kg•K
CD _{kw}	คือ การแพร่ผ่านในแนวขวาง (Cross-diffusion)	-
d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท	m
d _h	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะสำหรับเหนี่ยวนำอากาศของท่อขยาย	m
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขยายหน้าตัด	m
E	คือ แรงดันไฟฟ้าจากหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	Volt
F ₁ , F ₂	คือ Blending function	-
g	คือ ความเร่งโน้มถ่วงแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s ²
H	คือ ระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน	m
h _L	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ	W/m ² •°C
\bar{h}	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน	W/m ² •°C
I	คือ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสเตนเลส	A
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิ 26°C	W/m•°C
k	คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)	J/kg
L	คือ ความยาวท่อขยายหน้าตัดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศ	m
L _{cl}	คือ ความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) ของพื้นผิว	-
L _{st}	คือ ความยาวของแผ่นสเตนเลส	m
N	คือ จำนวนข้อมูลของความเร็วทั้งหมด	-
Nu	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)	-
Nu _L	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ที่สูญเสียจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	-
\overline{Nu}	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	-
P	คือ ความดันสถิต (Static pressure)	Pa
Pr	คือ แพลนด์นัมเบอร์ (Prandtl number)	-
Q _{input}	คือ อัตราการเกิดความร้อนจากแหล่งจ่าย (Power supply)	W/m ²

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์คำย่อ (ต่อ)		หน่วย
\dot{q}_{lossed}	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสี	W/m^2
$\dot{q}_{\text{convection}}$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	W/m^2
$\dot{q}_{\text{radiation}}$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน	W/m^2
r	คือ ระยะตามแนวรัศมีของท่อเจ็ท (Radius)	m
Ra_L	คือ เรย์ลีนัมเบอร์ (Rayleigh number)	-
Re	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)	-
H	คือ ระยะจากปากทางออกท่อขยายหน้าตัดถึงพื้นผิวฟุ้งชน	m
T_j	คือ อุณหภูมิที่ปากทางออกเจ็ท	$^{\circ}C$
T_s	คือ อุณหภูมิภายในห้องทดลอง	$^{\circ}C$
T_{wh}	คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน	$^{\circ}C$
T_{wnh}	คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน	$^{\circ}C$
\bar{T}_{wh}	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน	$^{\circ}C$
Tu	คือ ระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity)	-
U_i, U_j	คือ ส่วนประกอบของความเร็วเฉลี่ย	m/s
U_{τ}	คือ ความเร็วเฉือน (Shear velocity)	m/s
V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดจากแท่งทองแดงที่ขึง	Volt
V_i	คือ ความเร็วที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ	m/s
V_j	คือ ความเร็วอากาศจากปากทางออกท่อเจ็ท	m/s
\bar{V}_j	คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ศูนย์กลางปากทางออกของท่อเจ็ท	m/s
\bar{V}	คือ ความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งใดๆ	m/s
V'_t	คือ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใดๆ	m/s
V_{rms}	คือ ความเร็วของรากกำลังสองเฉลี่ย	m/s
W_{st}	คือ ความกว้างของแผ่นสเตนเลส	m
X, Y, Z	คือ พิกัดของแกนอ้างอิงในการทดลอง (Coordinates)	m

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์ตัวย่อ		หน่วย
y	คือ ระยะห่างจากชั้นขีดผนัง	m
y^+	คือ ตัวแปรไร้มิติของระยะห่างชั้นขีดผนัง (Dimensionless wall distance)	-
α	คือ ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)	$\text{W/m}^2\cdot\text{C}$
β	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนเชิงปริมาตร	K^{-1}
ε	คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อน (Emissivity)	-
ν	คือ ค่าความหนืดคิเนเมติก (Kinematic viscosity)	m^2/s
ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Density)	kg/m^3
σ	คือ ค่าคงที่ของสตีเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and boltzmann)	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}^4$
σ_k	คือ ค่าคงที่ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน	-
σ_ω	คือ ค่าคงที่ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายเฉพาะ	-
μ	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ (Dynamic viscosity)	$\text{kg/m}\cdot\text{s}$
μ_t	คือ สมการความหนืดแบบปั่นป่วน (Turbulent viscosity)	$\text{kg/m}\cdot\text{s}$
τ_w	คือ ความเค้นเฉือนบนผนัง (Wall shear stress)	N/m^2
ω	คือ อัตราการสลายตัวเฉพาะ (specific dissipation rate)	1/s
สัญลักษณ์ตัวห้อย		
c	คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)	-
cl	คือ ความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) ของพื้นผิว	-
i	คือ ค่าของข้อมูล ณ เวลาใดๆ	-
j	คือ เจ็ต (Jet)	-
k	คือ พลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy)	-
max	คือ สูงสุดหรือมากที่สุด (Maximum)	-
lossed	คือ การสูญเสียบนแผ่นสเตนเลส (Heat loss)	-
rms	คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared)	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

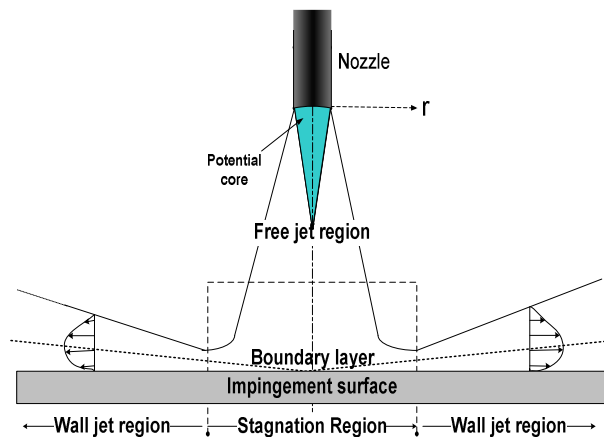
		หน่วย
สัญลักษณ์ตัวห้อย		
p	คือ ความดัน (Pressure)	-
s	คือ ภาวะอากาศโดยรอบ (Surrounding)	-
st	คือ แผ่นสแตนเลส (Stainless foil)	-
t	คือ ความปั่นป่วน (Turbulent)	-
t	คือ เวลา (Time)	-
w	คือ ผนัง (Wall)	-
wh	คือ ผนังมีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน (Wall heat flux)	-
wnh	คือ ผนังไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน (Wall no heat flux)	-
τ	คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress)	-
ω	คือ อัตราการสลายตัวเฉพาะ (specific dissipation rate)	-
∞	คือ ระยะอนันต์ (infinity)	-
สัญลักษณ์ตัวยก		
-	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล	-
+	คือ ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless)	-
'	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง ณ เวลาใดๆ ของข้อมูล (Fluctuation)	-

บทที่ 1

บทนำ

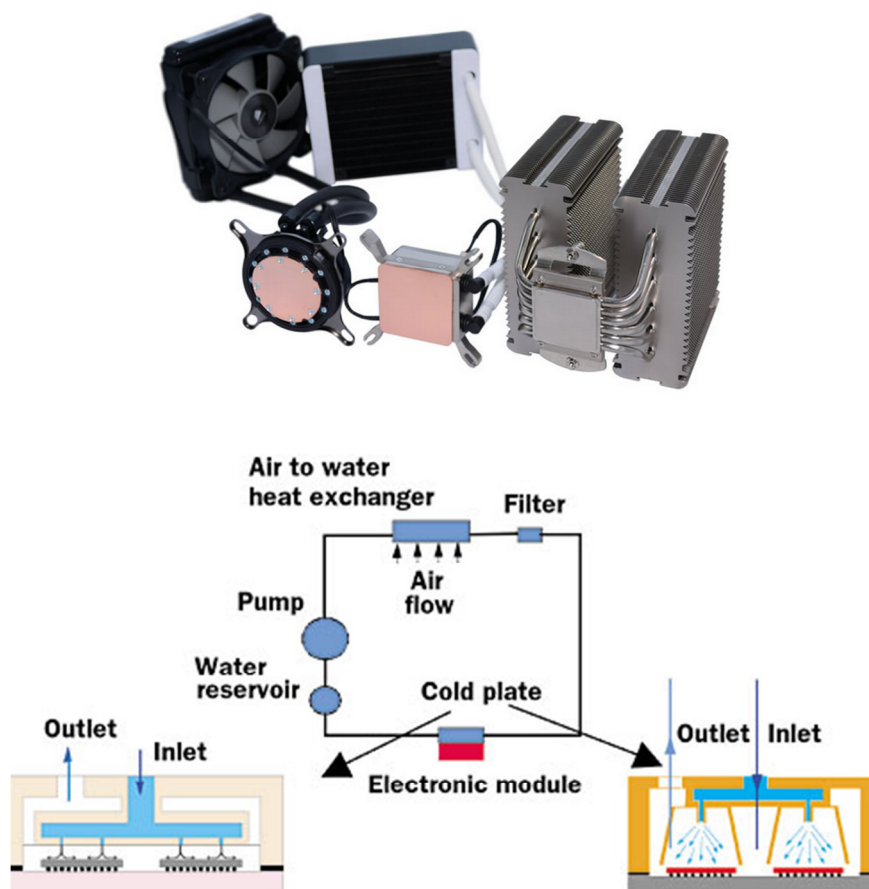
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ลักษณะการไหลของเจ็ทเป็นปรากฏการณ์การไหลของของไหลที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีลักษณะ โครงสร้างของการไหลที่ซับซ้อน มีการไหลแบบชั้นการไหลเฉือน (Shear layer) โดยมีรูปแบบการไหลที่หลากหลาย ซึ่งมีความสำคัญในทางกลศาสตร์ของไหล เช่น การไหลของเจ็ทแบบอิสระ การไหลของเจ็ทที่จำกัดบริเวณโดยผนัง การไหลของเจ็ทที่ปะทะพื้นผิว โดยส่วนใหญ่มักพบได้ทั่วไปในทางวิศวกรรมในกระบวนการให้ความร้อนหรือกระบวนการระบายความร้อน เช่น หัวฉีดเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ หัวจ่ายลมในระบบปรับอากาศ หัวเผาให้ความร้อนเพื่อให้ความร้อนพื้นผิว หรือหัวฉีดระบายความร้อนพื้นผิว เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน

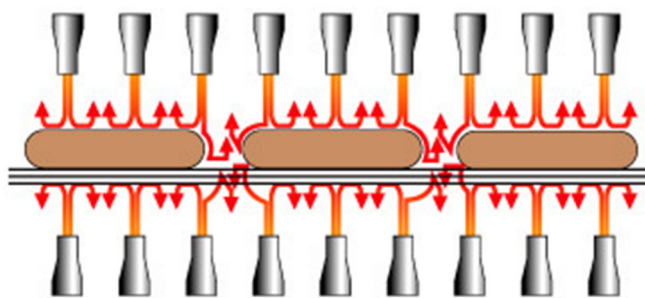
การใช้เจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเป็นวิธีการบังคับของไหลที่มีความเร็วพุ่งชนพื้นผิวที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง วิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรง และเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือ ให้อัตราส่วนระหว่างปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ออัตราการไหลที่สูง สามารถประหยัดพลังงานได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีอื่น



รูปที่ 1.2 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วิธีเจ็ทพุงชน

ในปัจจุบันมีงานวิจัยทางวิศวกรรมจำนวนมากที่ได้ศึกษาในเรื่องลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนจากการใช้เจ็ทพุงชนพื้นผิวในหลายวิธีการเช่นการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลที่บริเวณปากทางออกของเจ็ทเพื่อที่จะทำให้ลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยทำให้เกิดความปั่นป่วนของลำเจ็ทที่เพิ่มสูงขึ้น เพื่อต้องการให้การเพิ่มความสามารถของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุงชนพื้นผิว เพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน ทำให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ในระบบระบายความร้อนรวมถึงการประหยัดพลังงานของอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ และกระบวนการตัดโลหะ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนหรือการระบายความร้อนด้วยการใช้เจ็ทพุงชนบนพื้นผิวโดยตรง ซึ่งเมื่อหากสามารถเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทได้ จะทำให้ลดอัตราการใช้พลังงานของเจ็ทลงได้ ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ในปั้มหรือพัดลมได้ การใช้เจ็ทพุงชนพื้นผิวโดยตรงนั้นนอกจากนี้มีผลทำให้การให้ความร้อนหรือการระบายความร้อนบนพื้นผิวเกิดรวดเร็วขึ้นแล้วยังสามารถลดระยะเวลาของ

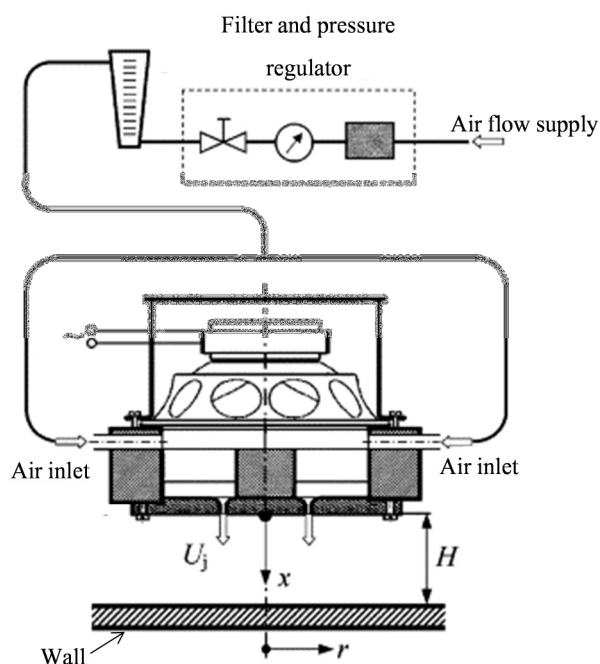
กระบวนการลงได้ ซึ่งหากมีการพัฒนาอุปกรณ์ด้านความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงจะสามารถช่วยลดต้นทุนการใช้พลังงานได้อย่างมาก



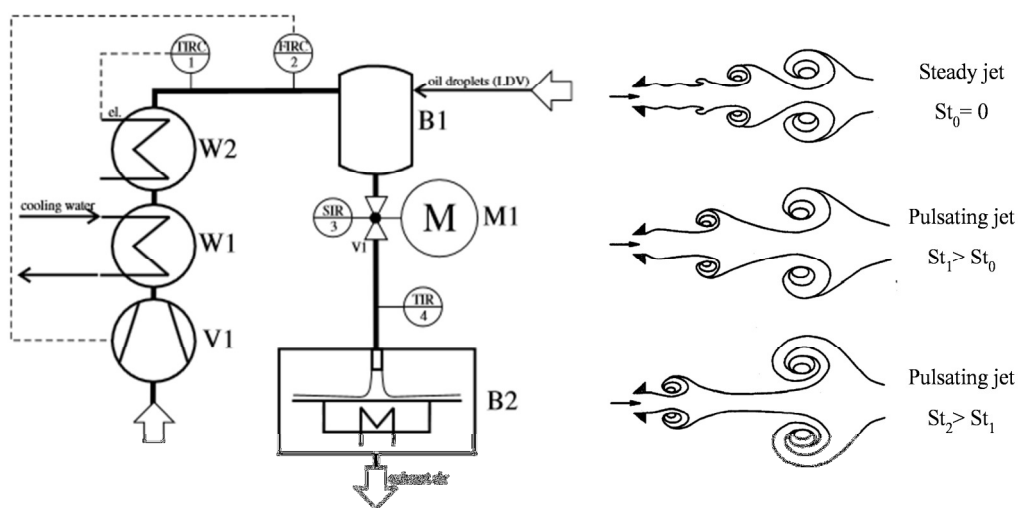
รูปที่ 1.3 แสดงถึงลักษณะการใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชน

โดยกรณีที่พื้นผิวที่ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดกว้างหรือต้องการควบคุมการแลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิว จำเป็นต้องใช้กลุ่มเจ็ทพุ่งชนหรือเจ็ทแบบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนเจ็ทลำเดี่ยว ทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้น ซึ่งโครงสร้างการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทแบบเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าพุ่งชนจะคล้ายกรณีของเจ็ทลำเดี่ยว

ปัจจุบันได้มีการศึกษารูปแบบการไหลของเจ็ทที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน พบว่ารูปแบบการไหลของเจ็ทที่มีการควบคุมการไหลให้เจ็ทมีความปั่นป่วนที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการไหลของเจ็ทแบบปกติ ซึ่งโดยทั่วไปการเพิ่มความปั่นป่วนของเจ็ทสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี วิธีแรก เป็นการควบคุมการไหลเจ็ทที่มีพลังงานภายนอกกระตุ้น (Active control) ซึ่งหลักของการทำงานคือ จะเป็นการควบคุมการไหลโดยใช้พลังงานจากภายนอกเป็นตัวกระตุ้น (Actuator) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความปั่นป่วนการไหลของของไหล เช่นการใช้ความถี่ของลำโพงเพื่อสร้างการสั่นสะเทือน ดังรูปที่ 1.4(ก) กระตุ้นทำให้ความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น หรือการใช้อุปกรณ์เชิงกลมาสร้างการสั่นสะเทือนของของไหล เช่น การติดตั้งชุดควาล์วเข้าไปในระบบท่อเจ็ท ดังรูปที่ 1.4(ข) เมื่อชุดควาล์วหมุนตัวด้วยความถี่ต่างๆ ทำให้การไหลของของไหลจะเกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น แต่วิธีการแบบควบคุมการไหลด้วยการใช้ตัวกระตุ้นจะมีข้อเสียหลายประการคือ สูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการควบคุมสั่งตัวกระตุ้น ต้องมีการบำรุงรักษาที่ดีเพราะตัวกระตุ้นมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และมีข้อจำกัดด้านความทนทาน ไม่สามารถที่จะนำตัวกระตุ้นมาติดตั้งใช้งานในสภาวะต่างๆ ได้ เช่นที่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมาก หรือบริเวณที่มีความชื้นสูงมาก



(ก) ลำโพงสร้างพลังงานเสียง [1]

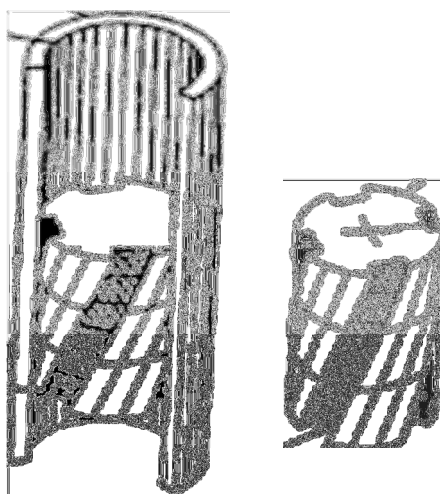


(ข) การหมุนของวาล์วทำให้เกิดการไหลแบบสั่น [2]

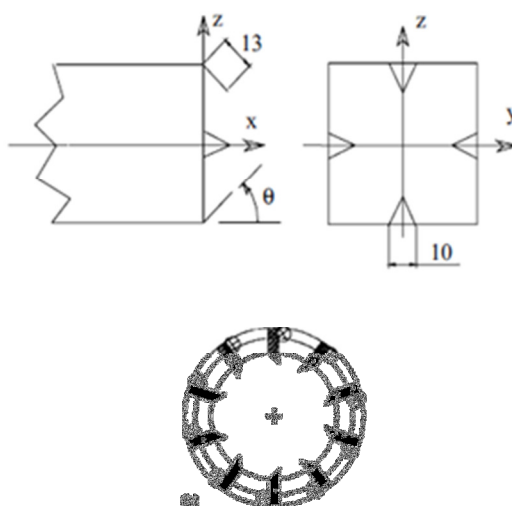
รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลเจ็ทที่มีพลังงานภายนอกกระตุ้น (Active control)

วิธีที่สองเป็นการควบคุมการไหลเจ็ทแบบไม่มีพลังงานภายนอกกระตุ้น (Passive control) ดังรูปที่ 1.5 โดยหลักของการทำงานคือ จะเป็นการควบคุมการไหลโดยไม่อาศัยพลังงานจากภายนอกมาควบคุมการไหล ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวแต่จะมีการใช้อุปกรณ์บางอย่างติดตั้งเข้าไปที่บริเวณท่อเจ็ทเพื่อต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการ

ไหลของของไหล เช่น การใส่แผ่นบิดในท่อเพื่อเพิ่มการไหลของของไหลแบบหมุนควงตามแนวแกนของของไหล การติดตั้งปีกขวางการไหลของของไหลเพื่อสร้างกระแสหมุนวนที่ด้านหลังของปีก (Vortex generator wing) หรือการใช้เจ็ทที่มีรูปร่างของปากทางออกที่เป็นแบบหน้าตัดไม่กลม (Non-circular jet) โดยการควบคุมการไหลแบบไม่มีการกระตุ้นจะมีข้อดีคือ ไม่มีอุปกรณ์ควบคุมที่ซับซ้อนและมีเคลื่อนที่ ทำให้ชุดอุปกรณ์ที่นำมาใช้มีราคาถูกลง สามารถใช้งานได้ในอุตสาหกรรมได้



(ก) การสอดแผ่นบิด [3]



(ข) การติดปีกสร้างกระแสหมุนวน

รูปที่ 1.5 แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลเจ็ทที่ไม่มีพลังงานภายนอกกระตุ้น (Passive control)

ในงานวิจัยนี้สนใจวิธีการควบคุมการไหลของเจ็ทแบบไม่มีการกระตุ้นจากภายนอก เพื่อเพิ่มความสามารถการผสมและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ใช้หัวฉีดแบบท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยม เนื่องจากง่ายต่อการสร้างหรือติดตั้ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายในโรงงานอุตสาหกรรม การศึกษาที่ผ่านมา ส่วนใหญ่เป็นเจ็ทปากทอกลมซึ่งการถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีเฉพาะบริเวณจุดตรงกลางที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งในกรณีที่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดกว้าง ควรใช้เจ็ทแบบปากทางออกเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทน จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาปรากฏการณ์ไหล การผสมและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากหัวฉีดแบบท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยม เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ของวิธีเพิ่มความสามารถการผสมและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ท

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

(1) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของเจ็ทแบบท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรณีเจ็ททอเปล่าและกรณีที่มีการปรับแต่งปากทางออกแบบ ติดตั้งแท่งทรงกระบอก และแผ่นซี่ฟันเลื่อย ขวางการไหลที่ปากทางออก

(2) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทจากท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าไหลปะทะ กรณีเจ็ททอเปล่าและกรณีที่มีการปรับแต่งปากทางออกแบบ ติดตั้งแท่งทรงกระบอก และแผ่นซี่ฟันเลื่อย ขวางการไหลที่ปากทางออก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

(1) ศึกษาเจ็ทจากท่อน้ำตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรณีเจ็ททอเปล่าและกรณีปรับปรุงปากทางออก โดยติดตั้งแท่งทรงกระบอก และแผ่นซี่ฟันเลื่อย ขวางการไหลที่ปากทางออก (โดยกำหนดให้พื้นที่การไหลที่ปากทางออกเท่ากันในทุกกรณี)

(2) ศึกษาการไหลของเจ็ทอากาศแบบอิสระ โดยการวัดการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนด้วย Hot wire probe

(3) ศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศนด้วยเทคนิค LIF (Laser Induced Fluorescent)

(4) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยใช้กล้องอินฟราเรด วัดการกระจายอุณหภูมิ

(5) ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS V.13 (Fluent)

(6) ศึกษาผลของระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ $H=2W$, $4W$, $6W$ และ $8W$ (โดยที่ W คือขนาดความกว้างของหน้าตัดท่อเจ็ทมีขนาด 40 mm)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) ได้แนวทางในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว โดยการติดตั้งอุปกรณ์แบบใหม่ที่บริเวณปากทางออกเจ็ท

(2) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบหรืออุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนหรือระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเช่น การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นโลหะ หรือการระบายความร้อนในชุดอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยเจ็ทแบบสี่เหลี่ยมพุ่งชนพื้นผิวนั้น จำเป็นจะต้องเข้าใจโครงสร้างและลักษณะการไหลของเจ็ทแบบสี่เหลี่ยมก่อนเนื่องจากโครงสร้างของเจ็ทแบบสี่เหลี่ยมมีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวมาก สำหรับหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของเจ็ทอิสระแบบสี่เหลี่ยม โครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนแบบสี่เหลี่ยม ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบสี่เหลี่ยมบนพื้นผิว

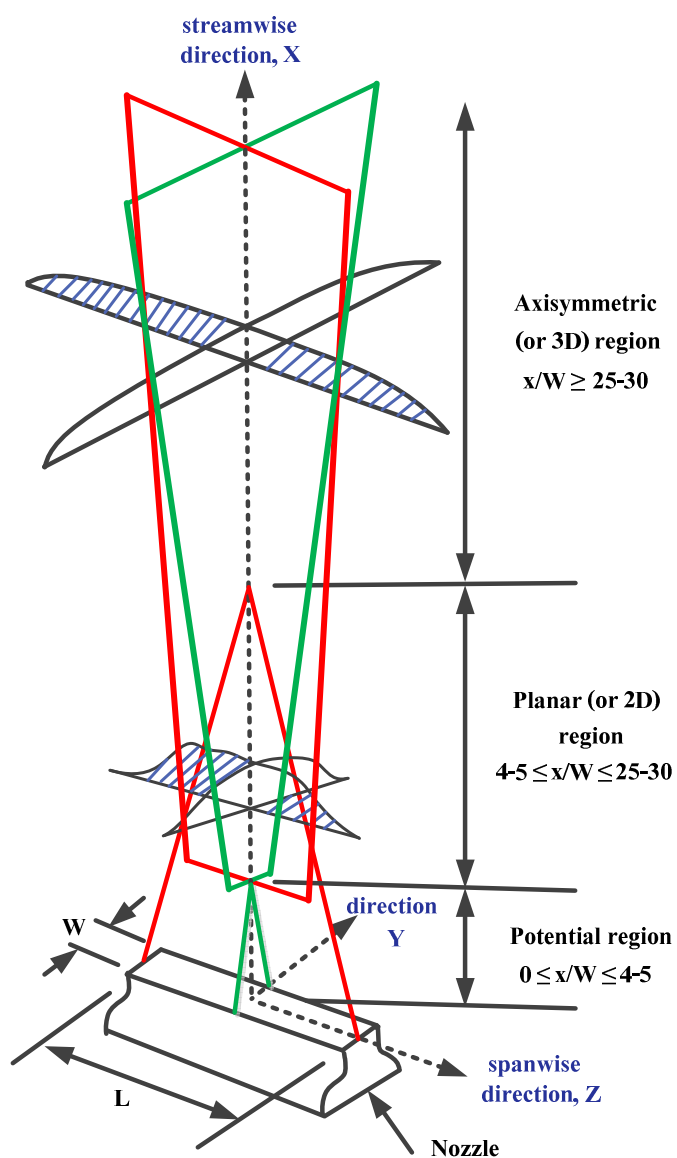
2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม

เจ็ท (Jet) คือ ลำของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดแบบสี่เหลี่ยมซึ่งไหลที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดนั้นมีการแลกเปลี่ยนความเร็วกับอากาศรอบๆทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของลำเจ็ท รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระจากหัวฉีดแบบสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้อย่างชัดเจนได้แก่

(1) บริเวณ Potential region คือบริเวณที่ความเร็วของเจ็ทบริเวณนี้สม่ำเสมอเกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกเจ็ท ที่ระยะห่างจากปากทางออกมีความหนาของ Shear layer เพิ่มขึ้นจนทำให้ Potential core ในแนวความกว้างของท่อเจ็ทหมดไป โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq x/W \leq 4-5$

(2) บริเวณ Planar หรือ Two-dimensional region คือบริเวณที่มีการพัฒนาของ Shear layer เพิ่มขึ้นจนทำให้ Potential core ในแนวความยาวของท่อเจ็ทหมดไป โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง $4-5 \leq x/W \leq 25-30$

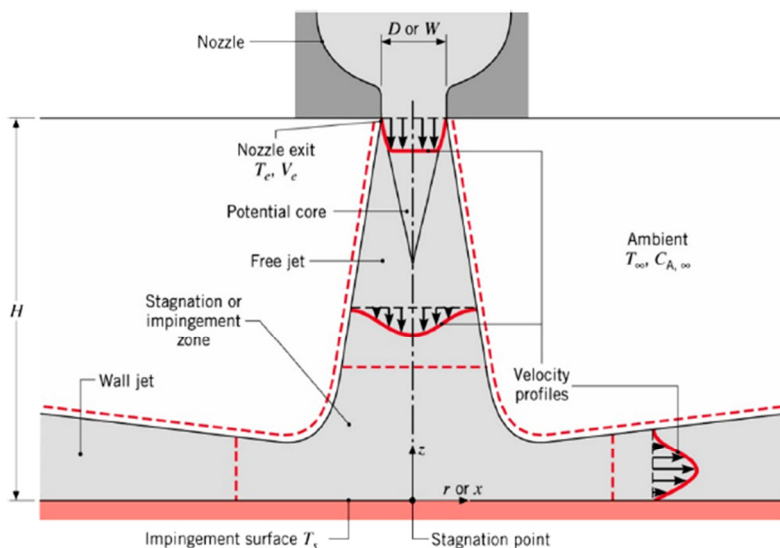
(3) บริเวณ Axisymmetric หรือ Three-dimensional region คือบริเวณที่การไหลของเจ็ทมีการขยายตัวในลักษณะสมมาตรตามแนวแกนเจ็ท โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง $x/W > 25-30$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระแบบสี่เหลี่ยม

2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือ ลำของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการไหลกรณีเจ็ทพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนสามารถแบ่งได้ 3 ส่วน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบ

(1) บริเวณเจ็ทอิสระ (Free jet region) คือบริเวณของไหลที่มีความเร็วพุ่งออกจากหัวฉีดสู่ของไหลที่อยู่รอบๆ โดยที่บริเวณแกนกลางของเจ็ทจะมีความเร็วสูงสุด และความเร็วของเจ็ทจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวแกนรัศมีของหน้าตัดเจ็ท

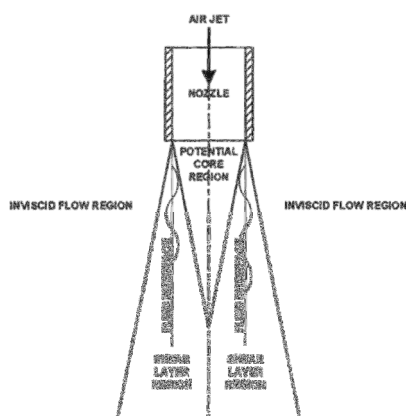
(2) บริเวณเจ็ทพุ่งชน (Impingement region) คือบริเวณที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง ก่อนเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลง และมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเจ็ทพุ่งชน หรือบริเวณหยุดนิ่ง (Stagnation point) บนพื้นผิว หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนผนังที่ถูกชนรอบบริเวณหยุดนิ่ง (Stagnation point) ภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของของไหลรอบบริเวณหยุดนิ่ง (Stagnation point) บนผนัง เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเจ็ทกะทันหันหลังจากการชน [4]

(3) บริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet region) คือการไหลรอบๆ บริเวณหยุดนิ่ง (Stagnation region) บนผนังหลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทของไหลจะเริ่มลดลง และชั้นขอบเขตการไหลบนผนังจะค่อยๆ หนาขึ้น

2.3 การหมุนวน (Vortex)

การเกิดการหมุนวน (Vortex) สามารถอธิบายได้โดยเมื่อมีการเอียงกันระหว่างอากาศที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดกับอากาศรอบๆ โดยที่บริเวณขอบของหัวฉีด จะทำให้เกิดชั้นรอยต่อที่มีการเอียงจึงส่งผลให้เกิดการกระเพื่อมเป็นคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่การเปลี่ยนแปลงอัตราไหลของเจ็ทอากาศที่พุ่งออกจากหัวฉีดหรือการเปลี่ยนแปลงเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds

Number) และความเข้มของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity) ที่บริเวณขอบของหัวฉีดส่งผลต่อความถี่และแอมพลิจูดของคลื่นที่ผิวรอยต่อ หากคลื่นดังกล่าวยังคงมีเสถียรภาพการสั่นจะเกิดเพียงแบบเดียวคือการสั่นที่ผิวรอยต่อ แต่เมื่อเกิดความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้เกิดคลื่นการสั่นที่รุนแรงขึ้นจนทำให้เกิดการม้วนตัวกลายเป็นลักษณะการหมุนวนที่เรียกว่า Toroidal Vortex และหากเรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Reynolds Number) หรือความเข้มของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity) มีค่าสูงขึ้นเกินกว่าช่วงความถี่ที่เหมาะสมจะทำให้การสั่นของรอยต่อนั้นรุนแรงจนไม่เกิดลักษณะการหมุนวน [5]

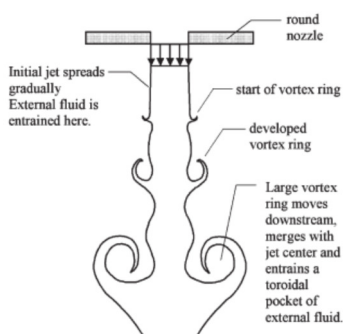


รูปที่ 2.3 ลักษณะการสั่นของรอยต่อระหว่างชั้นอากาศที่เหมือนกัน [5]

2.4 ความปั่นป่วนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว

พฤติกรรมของเจ็ทถูกแบ่งโดยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับเรย์โนลด์์นัมเบอร์ สามารถกำหนดได้โดยค่าความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้นของการไหลของของไหล ความหนืด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกของหัวฉีด ที่ $Re < 1,000$ สนามการไหลมีคุณสมบัติเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และที่ $Re > 3,000$ การไหลจะเกิดเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ (Turbulent flow) [6] และ $1,000 < Re < 3,000$ การไหลอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition flow) ความปั่นป่วนจะมีผลเป็นอย่างมากกับการถ่ายเทของความร้อนและการถ่ายเทมวล

จุดเริ่มต้นของเจ็ท มีแหล่งกำเนิดของความปั่นป่วนหลักคือการไหลเฉือนซึ่งเกิดที่บริเวณขอบของลำเจ็ท ซึ่งชั้นของการเฉือนนี้จะเริ่มจากการเริ่มเฉือนบาง ๆ ที่บริเวณขอบของปากทางออกของหัวฉีด แต่โดยธรรมชาติการพัฒนาของเรย์โนลด์์นัมเบอร์สูงๆ ชั้นของการเฉือนจะเกิดขึ้นแบบสุ่มไม่มีรูปแบบแน่นอน การไหลใกล้เคียงกับความไม่แน่นอนของ Kelvin-Helmholtz ดังรูปที่ 2.4 ได้แสดงรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ไม่มีรูปแบบแน่นอนของเจ็ทอิสระ (Free jet)



รูปที่ 2.4 ลักษณะความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระที่เกิดจากการไหลที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์สูง [5]

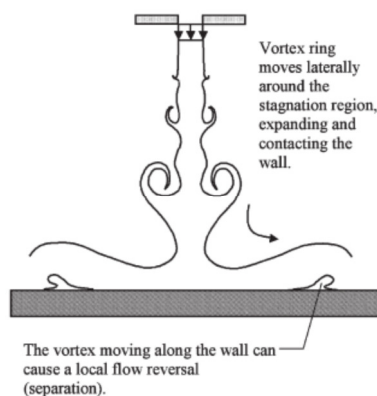
เมื่อความเร็วของการไหลมีค่าสูง ผลของความปั่นป่วนจากแรงเฉือนอาจเอาชนะความหนืดของของไหล บริเวณที่เกิดแรงเฉือนนี้ และอาจมีลักษณะการกระจายความเร็วที่ถูกพัฒนาโดยมีอิทธิพลมาจากการไหลเหนือด้านข้าง ลำดับถัดไปขนาดและพื้นที่ของการเกิดการหมุนวนเพิ่มมากขึ้นโดยแปลตามระยะห่างจากปากทางออกที่เพิ่มมากขึ้น จนเปลี่ยนรูปกลายเป็นกระแสมุขวนขนาดใหญ่ (Large-scale eddies) การหมุนวนขนาดใหญ่ที่สุดมีขนาดความยาวเท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเจ็ท และยังคงอยู่จนกระทั่งแตกออกกลายเป็นการหมุนวนขนาดเล็กๆ

เมื่อความเร็วตามแนวแกนของเจ็ทคงที่ ชั้นของการเฉือนจะขยายตัวออกมาจากตรงกลางของเจ็ท เพิ่มมากขึ้นตามแนวรัศมี การเฉือนนี้ทำให้เพิ่มความปั่นป่วนของการไหลเป็นผลให้มีขนาดของการหมุนวนที่เล็ก เมื่อความเร็วของการไหลลดลง จะเพิ่มกลไกที่มีอิทธิพลต่อความปั่นป่วนในสนามการไหล ส่งผลให้เกิดการเฉือนเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการหมุนวนใหญ่ขึ้น การลดความเร็วของการไหลจะสร้างความเค้นตึงมากและความเครียดตึงมาก ซึ่งช่วยเพิ่มความปั่นป่วน โมเดลการคำนวณเชิงตัวเลขโดย Abe และ Suga [7] แสดงให้เห็นการถ่ายโอนความร้อนและมวลในพื้นที่บริเวณนี้ ซึ่งเกิดกระแสมุขวนขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามเจ็ทผนังที่กำลังพัฒนาจะถูกความเค้นเฉือนทำลาย

การไหลของเจ็ทหลังฟุ้งชนไหลไปตามผนังจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความปั่นป่วนของเจ็ทผนัง เริ่มต้นด้วยการไหลแบบราบเรียบบนชั้นขอบเขต จนกระทั่งเกิดการปั่นป่วนซึ่งอยู่ห่างออกไปจากบริเวณฟุ้งชน ความปั่นป่วนนี้อาจจะมีความผันผวนของความเร็วที่ตั้งฉากกับผนัง และความแตกต่างระหว่างผนังกับการไหลแบบเลื่อน

ขนาดความปั่นป่วนของการไหลในเจ็ทอิสระมีผลเป็นอย่างมากกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนระหว่างบริเวณที่เจ็ทฟุ้งชนและผนัง รูปแบบของการหมุนวนในชั้นของการเลื่อนของเจ็ทอิสระ จะเป็นการหมุนวนหลักที่มีผลต่อการทะลุทะลวงชั้นขอบเขตการไหลและแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์และอุณหภูมิของของไหล ความสามารถของการหมุนวนจะช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนมวลและพลังงาน

สนามการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดบริเวณผนังเป็นเหตุให้เกิดกระแสหมุนวนบริเวณผนัง ซึ่งเป็นกระแสหมุนวนรอง ความผันผวนของความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีของความเร็วและความผันผวนของแตกต่างความดันจะสามารถสร้างการไหลผกผันบริเวณผนัง ที่บริเวณดังกล่าวเป็นจุดเริ่มของการไหลแยกตัวและเกิดกระแสหมุนวนรอง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การหมุนวนรองส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและมวลเหมือนกับการหมุนวนหลัก การแยกตัวส่งผลให้เกิดการสูญเสียโดยรวมของพลังงานจลน์ ปลายสุดของการไหลของพื้นที่ส่วนนี้อาจเกิดการถ่ายโอนที่ต่ำ

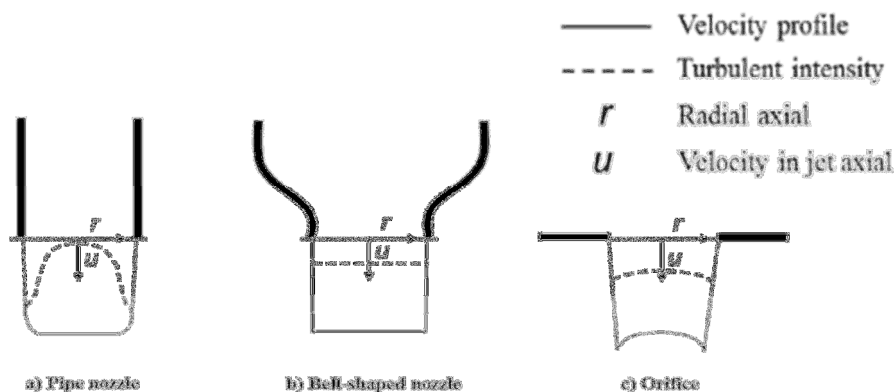


รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของเจ็ทฟุ้งชนพื้นผิว [5]

2.5 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

2.5.1 ชนิดของหัวฉีดเจ็ท

การกระจายความเร็ว (Velocity profile) และความเข้มของความปั่นป่วน (Turbulent intensity) ของเจ็ทที่ตำแหน่งปากทางออกของหัวฉีด 3 แบบที่นิยมใช้ทั่วไปพบว่าชนิดของหัวฉีดเจ็ทจะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ทของไหลที่ฉีดออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการกระจายตัวของความเร็ว และความปั่นป่วนที่ปากทางออกหัวฉีด

กรณีหัวฉีดแบบท่อเปิด (Pipe nozzle) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากท่อยาวที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ การกระจายตัวของความเร็วที่ปากทางออกจะมีลักษณะเหมือนกับการกระจายความเร็วของของไหลในท่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.6(a) ส่วนระดับความปั่นป่วนจะค่อนข้างสูงบริเวณใกล้ขอบท่อของท่อ

กรณีหัวฉีดแบบระฆัง (Bell-shaped nozzle) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากหัวฉีดที่มีลักษณะคล้ายระฆังที่มีการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดก่อนเจ็ทไหลออกจากปากทางออก จึงมีผลทำให้การกระจายตัวของความเร็วที่ปากทางออกค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอและระดับความปั่นป่วนที่ปากทางออกเจ็ทค่อนข้างต่ำ และสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.6(b)

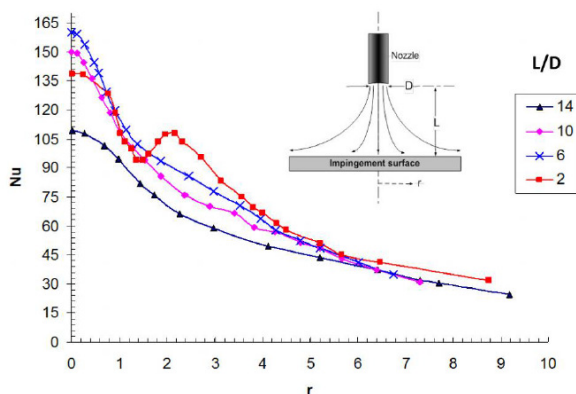
กรณีหัวฉีดแบบเจาะรู (Orifice) เจ็ทของไหลจะถูกฉีดออกจากรูเจ็ทที่เจาะบนแผ่นบาง ที่ปากทางออกเจ็ท ความเร็วบริเวณใกล้ขอบเจ็ทจะสูงกว่าบริเวณกลางเจ็ท และเจ็ทของไหลจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นในบริเวณใกล้ปากทางออก เกิดปรากฏการณ์ Vena contracta เนื่องจากทำให้พื้นที่หน้าตัดของเจ็ทที่ออกจากปากทางออกลดลง ในกรณีนี้ระดับความปั่นป่วนที่ปากทางออกจะค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับหัวฉีดแบบอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6(c)

2.5.2 ระยะห่างจากปากหัวฉีดถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

โดยทั่วไปบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะที่จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ซึ่งค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างปากหัวฉีดกับพื้นผิวที่ถูกชน และโครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ในกรณีที่บริเวณปลายของโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) พุ่งชนพื้นผิว จะได้ค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) จะสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะชนอื่นๆ เนื่องจากเจ็ทมีโมเมนตัม และมีความเข้ม

ของความปั่นป่วน (Turbulent intensity) ที่สูง แต่ถ้าระยะห่างระหว่างปากทางออกกับพื้นผิวมากขึ้นกว่านี้ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) จะลดลงตามระยะห่างระหว่างปากทางออกกับพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนต์ของเจ็ทที่พุ่งชนผนังลดลง

Baughn และ Shimizu [8] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเดี่ยวที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดแบบท่อ (Pipe nozzle) และพุ่งชนตั้งฉากกับแผ่นระนาบ ในการทดลองได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของระยะห่างจากปากท่อเจ็ทหัวฉีดถึงแผ่นระนาบโดยวัดการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์ที่จุดต่างๆ ตามแกนรัศมีของเจ็ท (r) รูปที่ 2.7 แสดงถึงการกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์ที่ระยะพุ่งชน (L/D) ต่างๆ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทเท่ากับ 23,750 พบว่ากรณีระยะพุ่งชน $L/D = 2$ อัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่ง ($r/D=0$) และจะค่อยๆลดลงแต่ที่ $r/D=1.5$ อัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆเพิ่มอีกครั้งจนถึงตำแหน่ง $r/D=2$ เกิดเป็นการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary heat transfer peak) หลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนสาเหตุของการเกิด Secondary peak อาจเกิดจากการที่ Potential core ของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว หลังจากนั้นเจ็ทผนังจะเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบปั่นป่วน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หรืออาจเกิดจากความเร่งของการไหลบนพื้นผิวในบริเวณหยุดนิ่ง (Stagnation region) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วงจาก $r/D=1$ ถึง 2 แต่ในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D > 2$ พบว่าค่าของนัสเซิลด์นัมเบอร์ของแต่ละระยะพุ่งชนจะสูงที่สุดที่ Stagnation point ($r/D=0$) และหลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในแกนรัศมี และค่าของนัสเซิลด์นัมเบอร์ที่จุด Stagnation point ($r/D=0$) มีค่าสูงสุดที่ระยะพุ่งชน $L/D = 6$ ซึ่งเป็นระยะที่โครงสร้างเจ็ทในส่วน Potential core เพิ่งจะหมดไปและระดับของการแปรปรวนของเจ็ทเริ่มสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่ระยะพุ่งชน $L/D > 6$ เนื่องจากโมเมนต์ของเจ็ทของไหลที่พุ่งชนพื้นผิวลดลงตามระยะพุ่งชนที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง

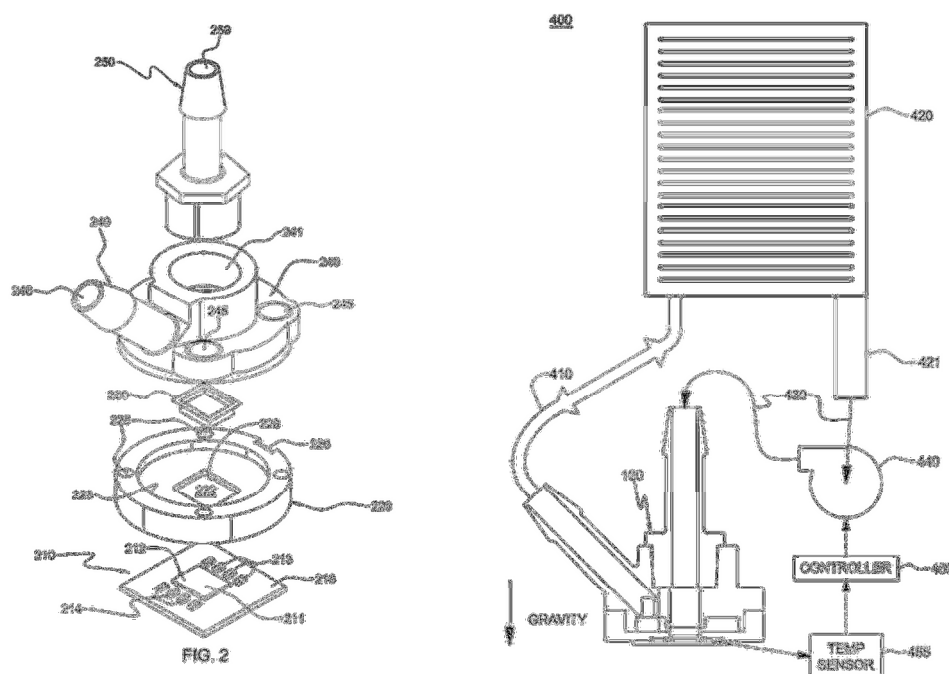


รูปที่ 2.7 การกระจายของนัสเซิลด์นัมเบอร์ตามแนวรัศมี ที่ระยะปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่ระยะพุ่งชนต่างๆ ($Re = 23,750$) [7]

2.6 ตรวจสอบเอกสาร

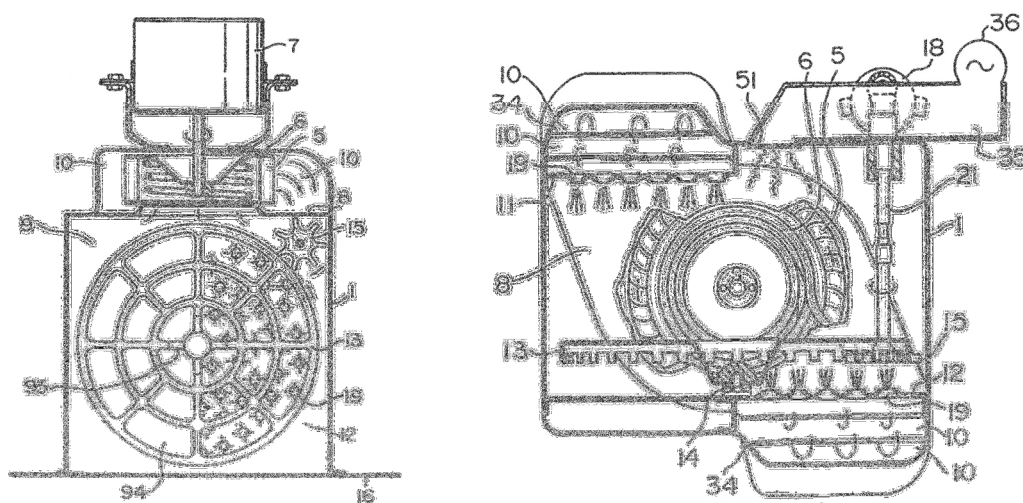
2.6.1 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานเจ็ทฟุ้งชน

สิทธิบัตรลำดับที่ US 7885074 B2 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเจ็ทน้ำปะทะโดยตรง [9] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเจ็ทน้ำฟุ้งชนโดยตรงตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 สำหรับโครงสร้างประกอบไปด้วยตัวชุดระบายความร้อนมีทางน้ำเข้าโดยผ่านรูเป็นออรัลฟุ้งชนพื้นผิวทำให้เกิดการระบายความร้อนบนพื้นผิวชิ้น หลังจากนั้นน้ำร้อนก็จะไหลออกตามช่องที่ได้ออกแบบไว้อีกท่อเพื่อไประบายความร้อนที่ชุดระบายความร้อน โดยในการทำงานจะใช้ตัววัดอุณหภูมิเพื่อสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานเพื่อสร้างเจ็ทมาฟุ้งชนพื้นผิวเพื่อระบายความร้อนเมื่อค่าความร้อนเกินกำหนด



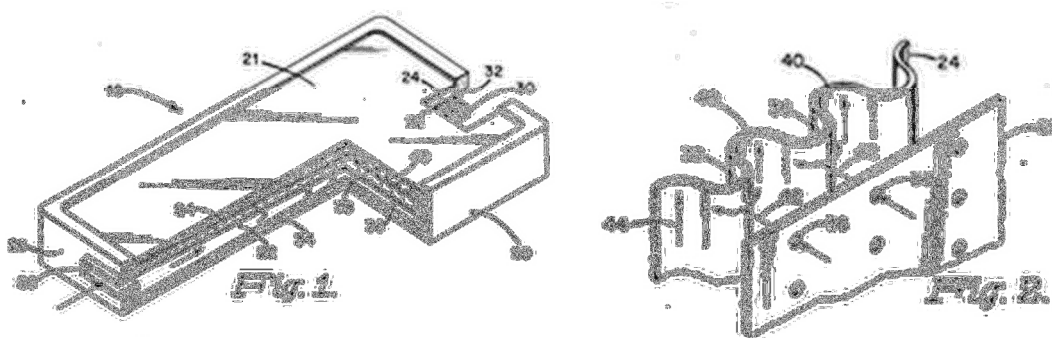
รูปที่ 2.8 การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเจ็ทน้ำปะทะโดยตรง
(สิทธิบัตรลำดับที่ US 7885074 B2 [9])

สิทธิบัตรลำดับที่ US 6218650 B1 เตาอบความเร็วสูงโดยใช้เจ็ทอากาศร้อนไหลปะทะ [10] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเตาอบความเร็วสูงโดยใช้เจ็ทอากาศร้อนไหลปะทะดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งมีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้กลุ่มของเจ็ทอากาศร้อนไหลปะทะควบคู่กับระบบไมโครเวฟโดยเจ็ทฟุ้งชนติดตั้งบริเวณด้านบนและด้านล่างของห้องเพื่อให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่อบมีความร้อนสม่ำเสมอในขณะที่งานนั้นหมุน โดยมีการติดตั้งชุดสร้างแรงดันลมเพื่อสร้างเจ็ทอากาศร้อนฟุ้งชน



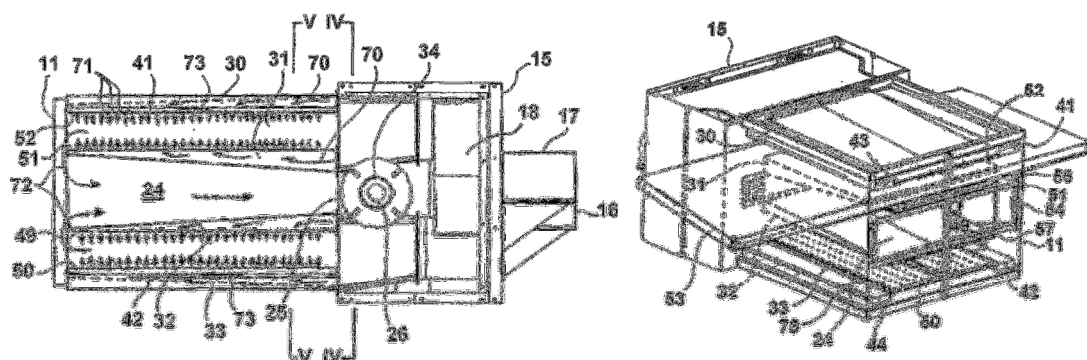
รูปที่ 2.9 เตาอบความเร็วสูงโดยใช้เจ็ทอากาศร้อนไหลปะทะ
(สิทธิบัตรลำดับที่ US 6218650 B1 [10])

สิทธิบัตรลำดับที่ US 4201195 A เจ็ทอากาศพุ่งชนเพื่อระบายความร้อนชุดสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ [11] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบายความร้อนของชุดสะสมพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เจ็ทอากาศพุ่งชนดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งในส่วนระบายความร้อนของชุดสะสมพลังงานแสงอาทิตย์มีทางเข้าและทางออกสำหรับทางเดินของอากาศมีการกั้นห้องไว้ 2 ส่วน โดยส่วนแรกมีลักษณะเป็นรอนจะเป็นส่วนที่ต้องการระบายความร้อนและส่วนที่เป็นแผ่นเรียบจะมีการเจาะรูเพื่อสร้างเจ็ทพุ่งชนซึ่งมีหลักการถ่ายเทความร้อนคือเมื่ออากาศไหลเข้ามาจะอยู่บริเวณด้านล่างของห้องแผ่นเรียบและไหลผ่านช่องที่เจาะไว้บนแผ่นเรียบเกิดการไหลแบบเจ็ทพุ่งชนแผ่นที่เป็นรอนเกิดการระบายความร้อนบนแผ่นรอนและอากาศที่ร้อนจะไหลออกในช่องทางที่กำหนด



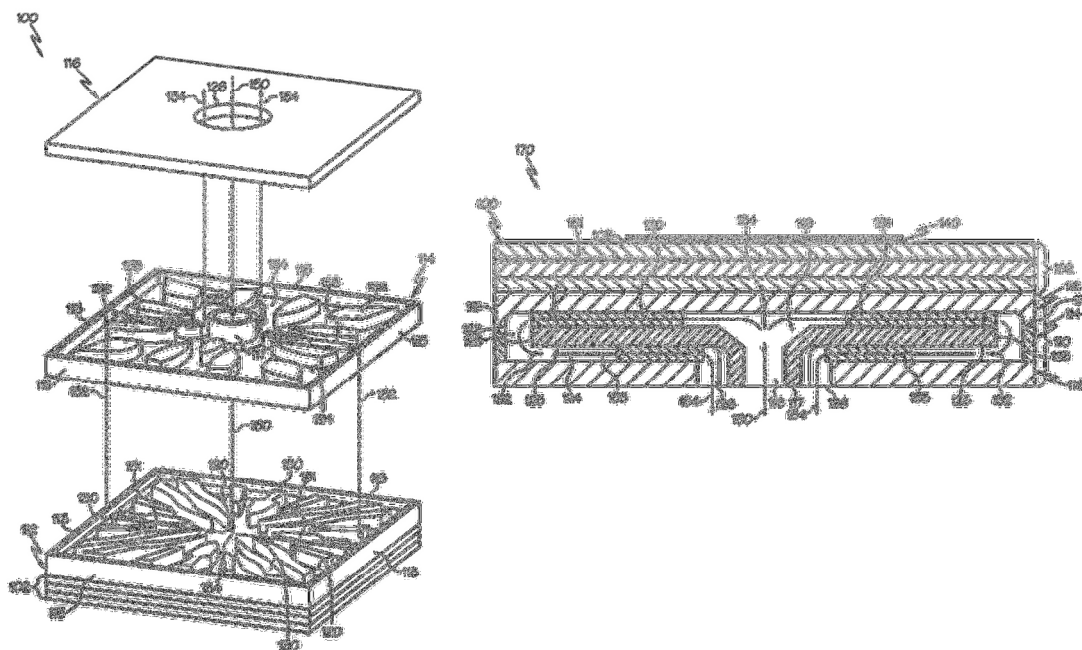
รูปที่ 2.10 เจ็ทอากาศพุ่งชนเพื่อระบายความร้อนชุดสะสมพลังงานแสงอาทิตย์
(สิทธิบัตรลำดับที่ US 4201195 A [11])

สิทธิบัตรลำดับที่ US 6880545 B2 เตอบสายพานลำเลียงแบบเจ็ทคู่ไหลปะทะ [12] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการออกแบบเตอบสายพานลำเลียงโดยเจ็ทคู่ไหลปะทะในทิศทางด้านบนและด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยสายพานจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชุดคือด้านบนและด้านล่าง เมื่อผลิตภัณฑ์ไหลผ่านสายพานลำเลียงด้านบนจะตกลงมายังด้านล่างซึ่งการสร้างในลักษณะแบบนี้เพื่อลดพื้นที่ของชุดเตอบ ในส่วนรายละเอียดเจ็ทพุ่งชนนั้นจะพบว่าอากาศจะถูกดูดด้วยเครื่องอัดอากาศโดยผ่านช่องบริเวณตรงกลางโดยจะอัดอากาศไหลไปยังท่อทั้งด้านบนและด้านล่างของชุดสายพานทั้ง 2 ชุดและไหลผ่านช่องที่เจาะรูไว้พุ่งชนผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสายพานทั้งด้านบนและด้านล่างทำให้ประสิทธิภาพของเตอบสูงกว่าเจ็ทไหลปะทะด้านเดียว



รูปที่ 2.11 เตอบสายพานลำเลียงแบบเจ็ทคู่ไหลปะทะ (สิทธิบัตรลำดับที่ US 6880545 B2 [12])

สิทธิบัตรลำดับที่ US 8199505 B2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจ็ทพุ่งชน [13] เป็นสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ระบบเจ็ทพุ่งชนตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.12 มีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์คือ ช่องทางเข้าตรงกลาง มีชั้นที่สองซึ่งเป็นพื้นผิวหลัก และชั้นที่สามซึ่งเป็นพื้นผิวรอง โดยพื้นผิวหลัก และพื้นผิวรองจะมีการจัดรูปแบบของวัสดุวางการไหลเพื่อควบคุมทิศทางของการไหล และมีช่องเล็กๆ เป็นจำนวนมากเพื่อเพิ่มบริเวณพุ่งชนตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางให้ครอบคลุมพื้นที่มาก อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้ในการระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

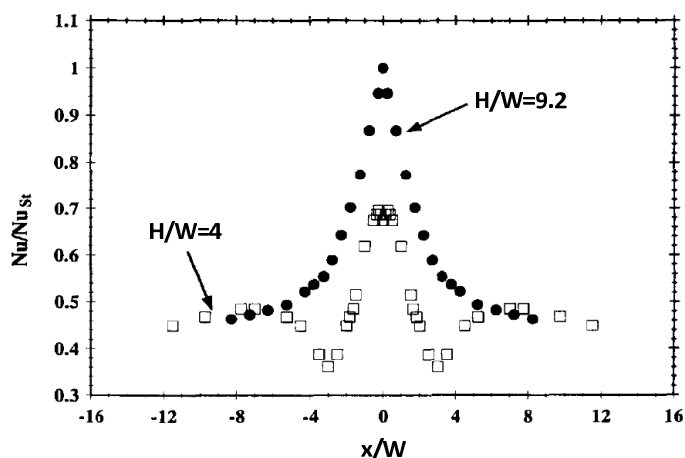


รูปที่ 2.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเจ็ทพุ่งชน (สิทธิบัตรลำดับที่ US 8199505 B2 [13])

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ทพุ่งชน

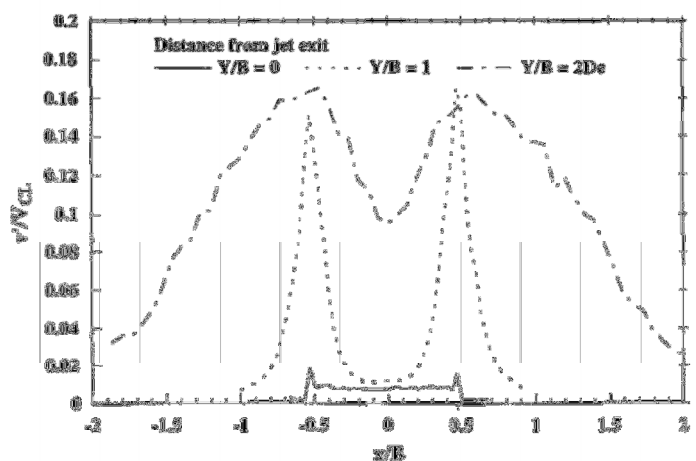
2.7.1 เจ็ทเดี่ยวพุ่งชนแบบไหลต่อเนื่อง (Single steady jet impingement)

Ashforth-Frost และคณะ [14] ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทจากหัวฉีดแบบปากทางออกสี่เหลี่ยม (Slot nozzle) ที่พุ่งชนพื้นผิวโดยทำการวัดความเร็วเฉลี่ยและความปั่นป่วน (Turbulence) ตามแนวแกนของเจ็ทและหน้าตัดของเจ็ท จากการศึกษาพบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสอดคล้องกับความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่วัดได้ คือ ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4W$ (W คือความกว้างของปากทางออก) ซึ่งเป็นระยะที่โพเทินซีลคอร์ดของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว พบว่าระดับความปั่นป่วนจุดที่เจ็ทพุ่งชนบนผนังมีค่าน้อย และในขณะที่เจ็ทไหลบนพื้นผิวระดับความปั่นป่วนจะเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิว ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดสองบริเวณ คือ จุดที่เจ็ทพุ่งชนและบริเวณที่ห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชน แต่ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=9.2W$ เนื่องจากที่ระยะดังกล่าวโพเทินซีลคอร์ดของเจ็ทหมดลงทำให้ระดับความปั่นป่วนในเจ็ทสูงขึ้น และเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนที่ระยะห่างจากจุดที่เจ็ทพุ่งชนการถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับ



รูปที่ 2.13 การกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน [14]

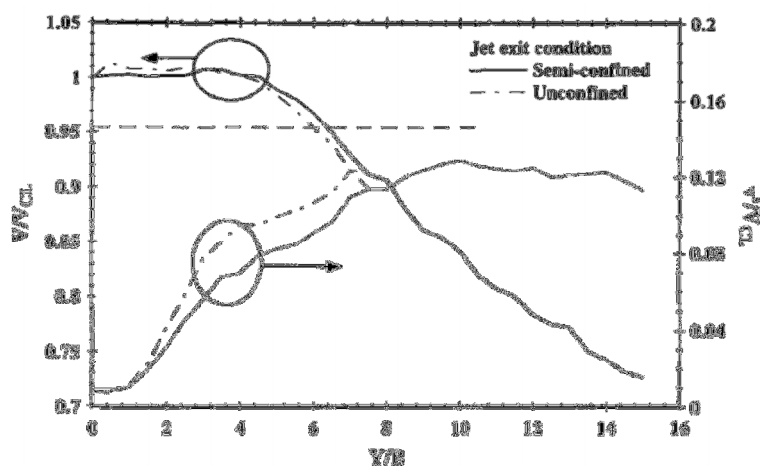
ในส่วนของการพัฒนาความปั่นป่วนในแนวแกนเจ็ทดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสดงทิศทางและขนาดของความปั่นป่วนบริเวณปากทางออกเจ็ท โดยที่ระยะห่างจากปากทางออกมีค่าต่ำ ค่าความปั่นป่วนจะมีค่าน้อยในแนวความกว้างปากทางออกเจ็ท โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นบริเวณขอบของลำเจ็ทเนื่องจากมีแรงเฉือนระหว่างลำเจ็ทและของไหลบริเวณโดยรอบและเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะ $Y/W=1$ ความปั่นป่วนที่บริเวณขอบลำเจ็ทจะสูงขึ้น และที่ระยะ $Y/W=2De$ ความปั่นป่วนที่ขอบลำเจ็ทจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ระยะ $Y/W=1$ แต่บริเวณจุดศูนย์กลางเจ็ทจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าที่ระยะ $Y/W=1$ เนื่องจากโมเมนตัมของเจ็ทลดลง



รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของความปั่นป่วนในแนวแกนเจ็ท [14]

ค่าความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทในแนวทิศทางตามแนวแกนเจ็ทมีการศึกษาใน 2 กรณีคือกรณีติดตั้งแผ่นกั้นด้านหลังปากทางออกเจ็ทและกรณีไม่มีแผ่นกั้นพบว่าทั้ง 2 กรณีค่า

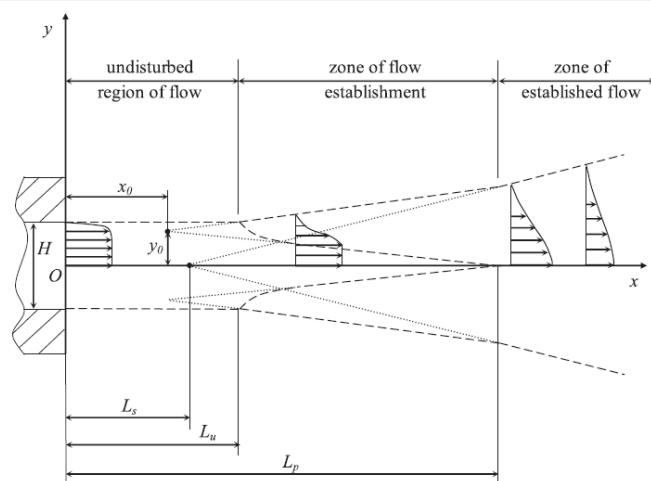
ความเร็วที่ระยะ $Y/W=4$ มีค่าที่เท่ากันแต่เมื่อระยะห่าง $Y/W > 4$ จะมีค่าที่แตกต่างกันโดยเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มสูงขึ้นค่าความเร็วจะลดลงอย่างต่อเนื่องและความปั่นป่วนกรณีไม่ติดตั้งแผ่นกั้นจะมีความปั่นป่วนที่สูงกว่าเนื่องจากความเร็วกรณีไม่ติดตั้งแผ่นกั้นจะลดลงในอัตราที่สูงกว่าซึ่งเกิดการแพร่กระจายของลำเจ็ททำให้ค่าความปั่นป่วนสูง เมื่อค่า Potential core เท่ากับ 95 เปอร์เซนต์พบว่ากรณีติดตั้งแผ่นกั้นทำให้ค่า Potential core ยาวกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.15



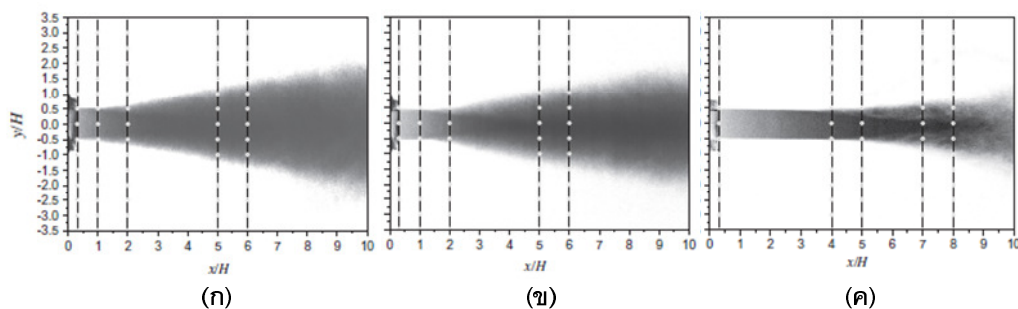
รูปที่ 2.15 ความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทในทิศทางแนวแกนเจ็ทบริเวณจุดกลางท่อเจ็ท [14]

Fabio Gori, Ivano Petracchi และคณะ [15] ได้ศึกษาวิวัฒนาการของการไหลและความปั่นป่วนจากหัวฉีดเจ็ทแบบสลิตด้วยวิธีการถ่ายภาพอนุภาคเฉลี่ย (PIV) และการวัดด้วย Hot Film Anemometer ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ในการทดลองที่ 2200, 3400, 6800, 10400, 22000 และ 35000 ตามลำดับ ซึ่งแสดงบริเวณต่างๆ ของการไหล ดังรูปที่ 2.16

เมื่อลำเจ็ทเคลื่อนที่ออกมาจากปากทางออกเจ็ทแบบสลิต การไหลจะยังไม่เกิดความปั่นป่วน เป็นบริเวณในช่วง Undisturbed หลังจากนั้นจะมีการพัฒนาของ Shear layer ที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ทและของไหลที่อยู่รอบข้าง เกิดการผสมกันระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆ Potential core จะเริ่มลดลงเรื่อยๆ ไปพร้อมๆ กับการเกิดความปั่นป่วนของอากาศที่เกิดจาก Shear layer ของเจ็ทและอากาศรอบๆ ซึ่งอยู่ในบริเวณ Establishment และเมื่อ Potential core หดลง ช่วงหลังจากนี้คือช่วงของ Established คือช่วงที่เกิดการไหลเป็นแบบปั่นป่วนทั้งหมด



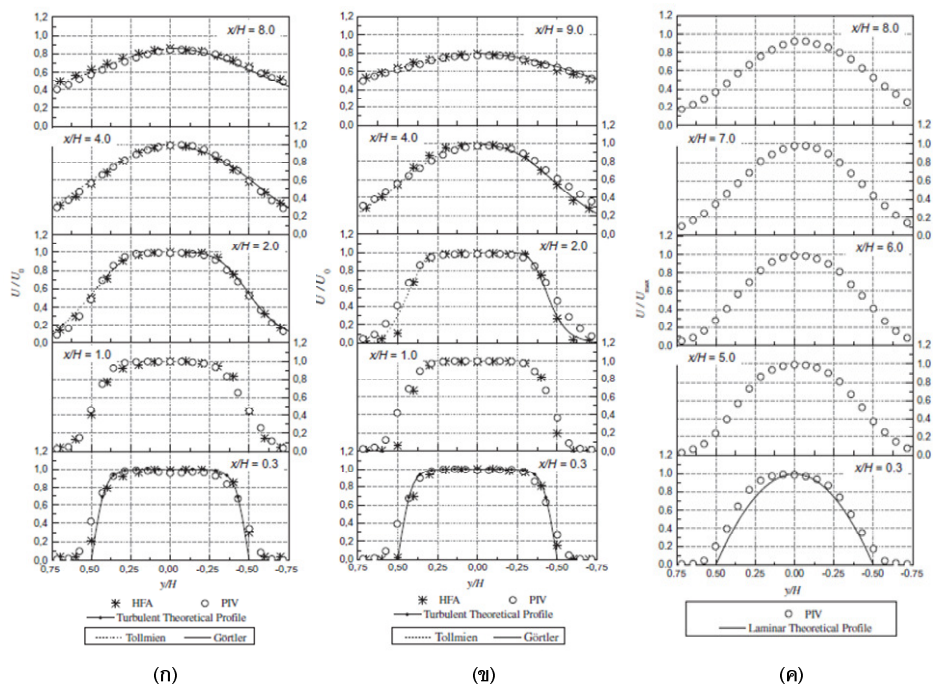
รูปที่ 2.16 แสดงวิวัฒนาการของเจ็บบนหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่บริเวณต่างๆ



รูปที่ 2.17 ถ่ายภาพโครงสร้างของการไหลด้วยการถ่ายภาพอนุภาคเฉลี่ย (PIV)

ณ ตำแหน่ง (ก) $Re=35000$ (ข) $Re=22000$ และ (ค) $Re=2200$ [15]

ซึ่งจากผลการศึกษาจะพบว่าที่เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงๆบริเวณการไหลที่เป็นแบบ Undisturbed จะมีระยะที่น้อยและจะเริ่มเกิดความปั่นป่วนพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆไปในทิศทางตามแนวการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.17(ก) จะเริ่มเกิดความปั่นป่วนของลำเจ็ทที่ค่า $x/H=1$ รูปที่ 2.17(ข) จะเริ่มเกิดความปั่นป่วนของลำเจ็ทที่ค่า $x/H=1-2$ และ รูปที่ 2.17(ค) จะเริ่มเกิดความปั่นป่วนของลำเจ็ทที่ค่า $x/H=4$



รูปที่ 2.18 ความเร็วของลำเจ็ทที่แต่ละตำแหน่งจากภาพอนุภาคเคลื่อนที่ (PIV) และการวัดด้วย Hot Film Anemometer ณ ตำแหน่ง (ก) $Re=35000$ (ข) $Re=22000$ และ (ค) $Re=2200$ [15]

อัตราส่วนของความเร็วต่อความเร็ว ณ กึ่งกลางที่ปากทางออกท่อเจ็ทแบบสลีตในทิศทางความกว้างของท่อเจ็ท y/H และในแต่ละตำแหน่งระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท x/H ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ค่า Re สูงๆความเร็วที่ปากทางออกเจ็ทจะมีความสม่ำเสมอทั้งระนาบ แตกต่างจากผลของ Re ต่ำ เพราะอัตราส่วนความเร็วจะมีสูงเฉพาะที่กึ่งกลางท่อเท่านั้น

Mirosław, Zukowski [16] ศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนของเจ็ทที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบมีผนังด้านท่อเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเรียบโดยใช้ IR Camera และการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทดลองเพื่อหาค่าที่มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนสูงสุดเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบพัฒนาระบบระบายความร้อนให้กับชุดโซล่าเซลล์ โดยในการทดลองมีตัวแปรและเงื่อนไขทั้งหมดคือ

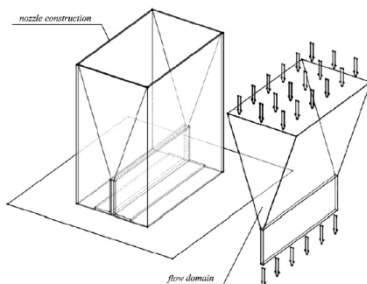
ความกว้างของท่อเจ็ทแบบสลีต $B = 1.0, 1.5$ และ 2.0 mm.

ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่ 19.5 องศาเซลเซียส

ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชน $H/B = 4, 6, 8$ และ 10

ความเร็วของเจ็ทที่ปากทางออก $V = 5, 10, 15$ และ 20 m/s

ทำการทดลองที่ค่า Re ตั้งแต่ 332 และค่าสูงสุด 2656

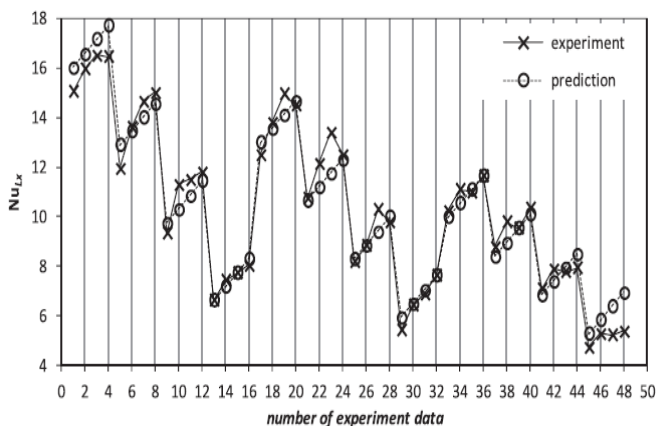


รูปที่ 2.19 แสดงท่อเจ็ทแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง [16]

ได้ทำการออกแบบการทดลองทั้งหมด 48 เงื่อนไข ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง และผลการทดลอง

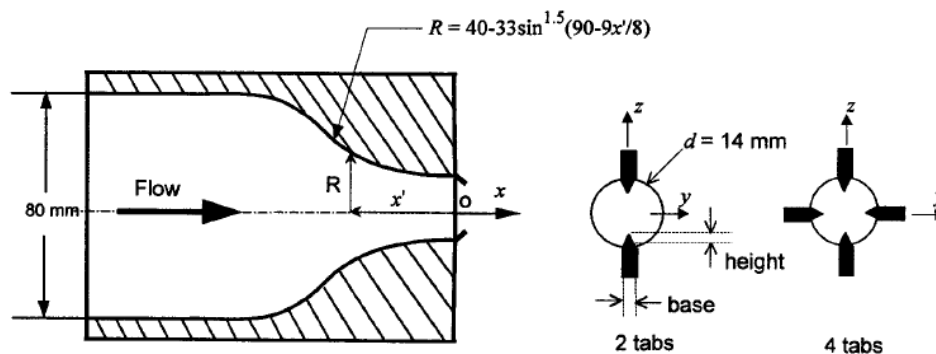
No.	Re	B	H/B	No.	Re	B	H/B
1	2656	0.0020	10	25	996	0.0015	10
2	2656	0.0020	8	26	996	0.0015	8
3	2656	0.0020	6	27	996	0.0015	6
4	2656	0.0020	4	28	996	0.0015	4
5	1992	0.0020	10	29	498	0.0015	10
6	1992	0.0020	8	30	498	0.0015	8
7	1992	0.0020	6	31	498	0.0015	6
8	1992	0.0020	4	32	498	0.0015	4
9	1328	0.0020	10	33	1328	0.001	10
10	1328	0.0020	8	34	1328	0.001	8
11	1328	0.0020	6	35	1328	0.001	6
12	1328	0.0020	4	36	1328	0.001	4
13	664	0.0020	10	37	996	0.001	10
14	664	0.0020	8	38	996	0.001	8
15	664	0.0020	6	39	996	0.001	6
16	664	0.0020	4	40	996	0.001	4
17	1992	0.0015	10	41	664	0.001	10
18	1992	0.0015	8	42	664	0.001	8
19	1992	0.0015	6	43	664	0.001	6
20	1992	0.0015	4	44	664	0.001	4
21	1494	0.0015	10	45	332	0.001	10
22	1494	0.0015	8	46	332	0.001	8
23	1494	0.0015	6	47	332	0.001	6
24	1494	0.0015	4	48	332	0.001	4



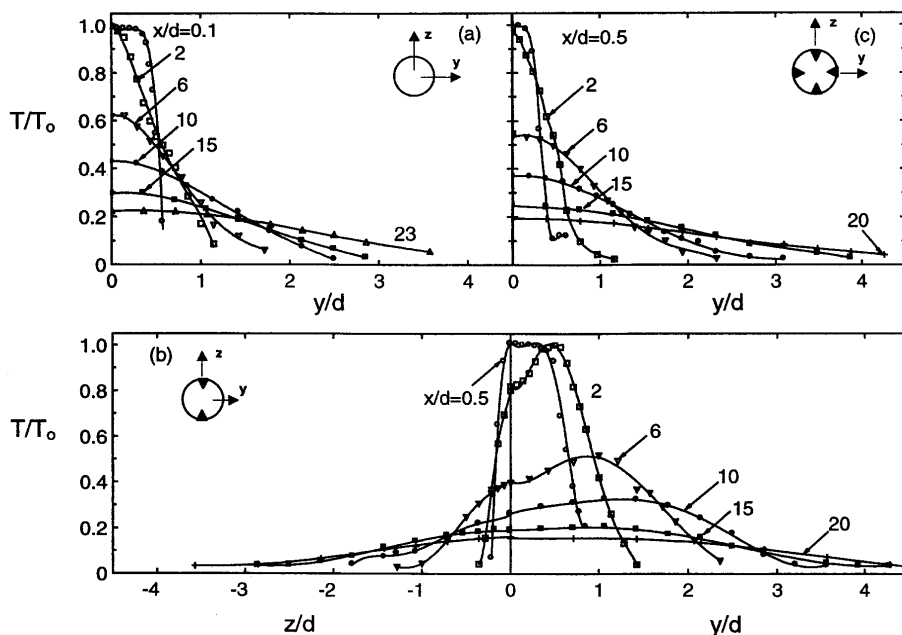
จากการทดลอง ผลการทดลองคือตัวแปรที่มีผลต่อการระบายความร้อนในการทดลองนี้คือ ค่า Re และ ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนจากตารางผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าผลจากการทดลองที่ค่า Re = 1992 เท่ากัน แบบที่ 8 B = 20 mm และแบบที่ 20 B = 15 mm ซึ่งผลการระบายความร้อนมีความใกล้เคียงกันมาก และที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงผนังที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าน้อยผลการระบายความร้อนมีค่าสูง และจะลดลงเมื่อมีระยะห่างเพิ่มมากขึ้น

2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการติดตั้งอุปกรณ์ที่บริเวณปากทางออกเจ็ท

Mi และ Nathan [17] ได้ศึกษาลักษณะการไหลและการกระจายของอนุภาคนิวเคลียสของเจ็ทที่ติดแผ่น Tab รูปร่างสามเหลี่ยมที่ปากทางออกหัวฉีด โดยทดลองกรณีที่ติดแผ่น Tab 2 ตำแหน่ง และติดแผ่น Tab 4 ตำแหน่ง ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.20 ในการทดลองได้กำหนดให้อุณหภูมิเจ็ทสูงกว่าอุณหภูมิอากาศรอบๆ จากนั้นได้ทำการวัดการกระจายอนุภาคนิวเคลียสที่ปากทางออกเจ็ทรูปที่ 2.21 แสดงการกระจายอนุภาคนิวเคลียสตามแนวรัศมีที่ปากทางออกเจ็ท โดยกราฟแต่ละเส้นแสดงที่ระยะห่างออกจากปากทางออกเจ็ท (x) ของแต่ละการทดลอง พบว่า ผลของการติดแผ่น Tab รูปร่างสามเหลี่ยมทำให้การกระจายอนุภาคนิวเคลียสที่แต่ละระยะจากปากทางออกเจ็ทลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเจ็ทที่ไม่ติดแผ่น Tab โดยเฉพาะที่ระยะห่างออกจากปากทางออกเจ็ทอยู่ในช่วง $x/d < 6$ ส่วนที่ระยะ $x/d > 6$ การกระจายอนุภาคนิวเคลียสของเจ็ททั้งสามแบบมีความแตกต่างกันไม่มากนัก จากผลการทดลองสามารถสรุปลักษณะการไหลของเจ็ทที่ติดแผ่น Tab มีการผสมกับอากาศรอบๆ ได้ดีกว่าเจ็ทที่ไม่ติดแผ่น Tab โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้กับปากทางออกเจ็ท

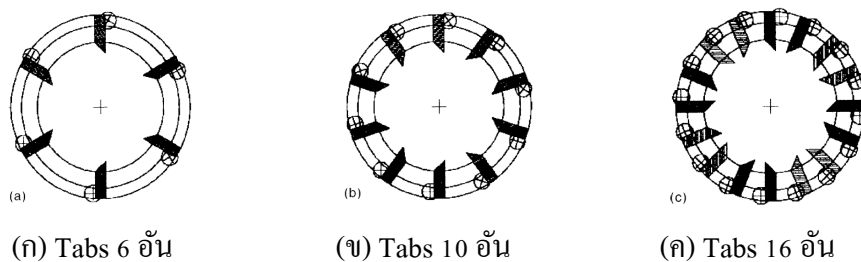


รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการติดแผ่น Tab รูปร่างสามเหลี่ยมที่ปากทางออกเจ็ท [17]



รูปที่ 2.21 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ปากทางออกเจ็ท [17]

Gao และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยติดตั้ง Tabs สามเหลี่ยมที่ปากทางออกเจ็ทสามแบบ โดยแต่ละแบบแตกต่างกันที่จำนวน Tabs 6, 10 และ 16 อัน ตามลำดับตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.22 ในการทดลองได้ทำการปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $H=2D-10D$ โดยที่ D คือขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด นอกจากนี้ได้ทำการปรับระยะยื่นของปลาย Tabs ถึงพื้นผิวด้านในของท่อเจ็ท (Protruding distance) อยู่ในช่วง $P=0.06D-0.15D$ สำหรับมุมระยะห่างระหว่าง Tabs กำหนดให้มีค่าเท่ากัน รูปที่ 2.23 แสดงผลการทดลอง จากรูปพบว่า การติด Tabs มีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น โดยที่จำนวน Tabs 16 อัน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด สำหรับผลของระยะยื่นของปลาย Tabs ถึงพื้นผิวด้านในของท่อเจ็ทในกรณีที่มีระยะ $P=0.15D$ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ระยะ $P=0.15D$

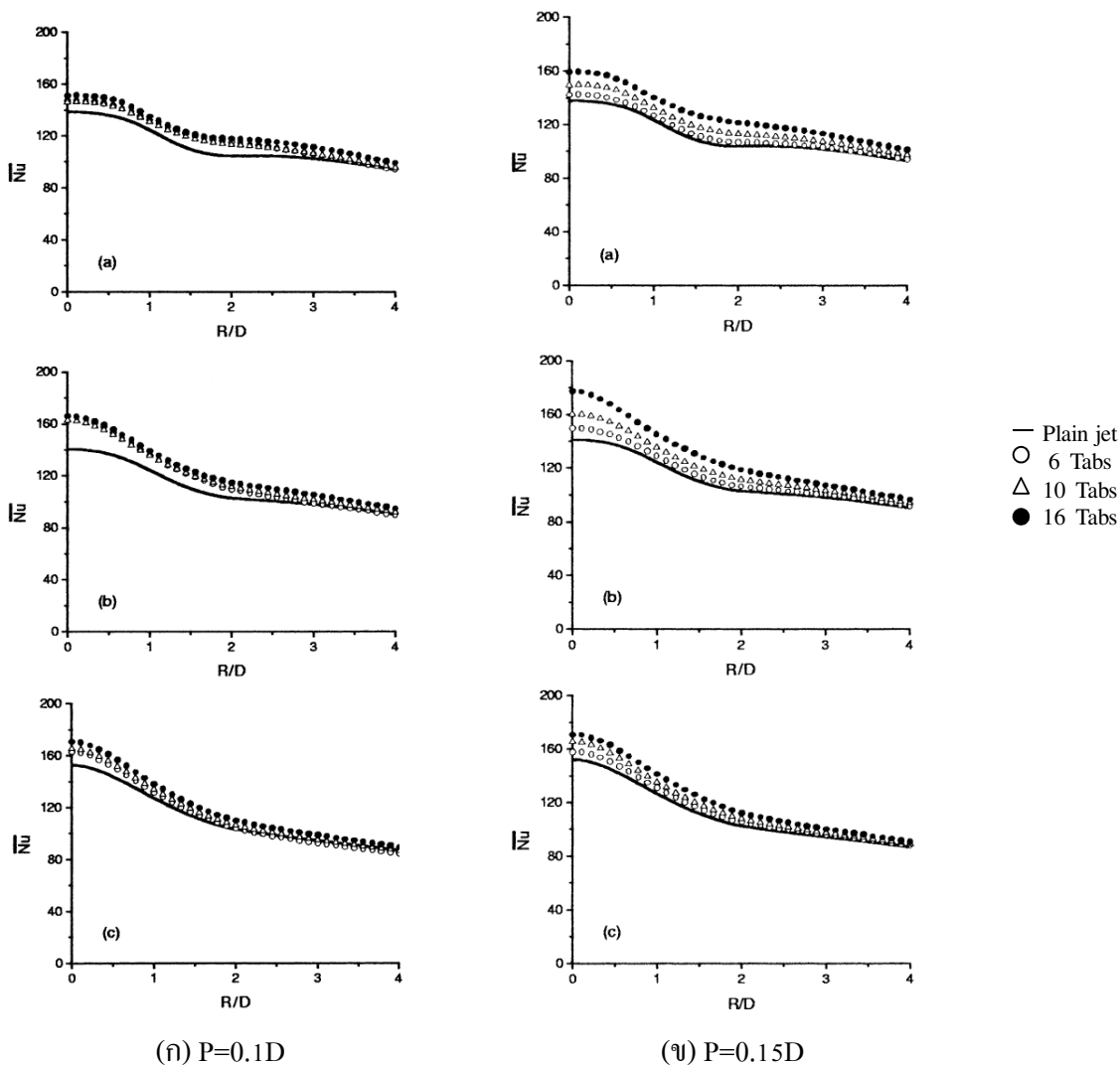


(ก) Tabs 6 อัน

(ข) Tabs 10 อัน

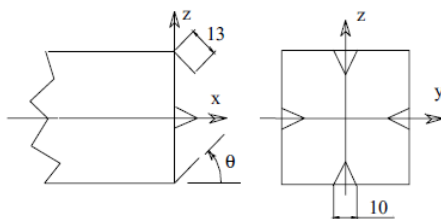
(ค) Tabs 16 อัน

รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการติดตั้ง Tabs สามเหลี่ยมที่ปากทางออกเจ็ททั้งสามแบบ [18]



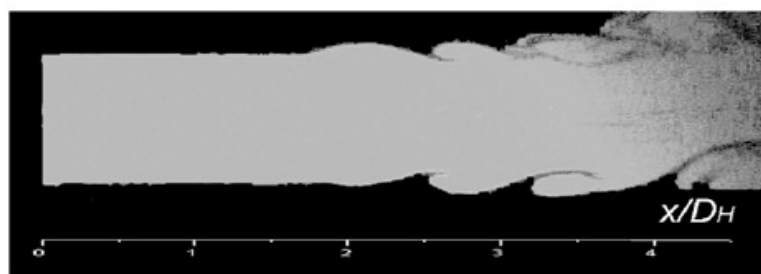
รูปที่ 2.23 แสดงค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวรัศมีเจ็ท [18]

Wang และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาลักษณะของเจ็ทที่ปากทางออกมีลักษณะสี่เหลี่ยมขนาด 60x60 mm มีการติด tabs ที่มีความกว้างฐาน $b=10$ mm และสูง $h=13$ mm เพื่อสร้างกระแสนวนวน ในการทดสอบจะใช้ Laser Fluorescence ในการสังเกต และใช้ Laser Doppler ในการวัดความเร็ว ซึ่ง tabs ที่ติดตั้งจะมีลักษณะติดโดยทำมุมเอียง 45° และ 135° ซึ่งจะทำการศึกษาที่ระยะ $x/D_H = 0.25, 0.75, 1.25$ และ 1.75

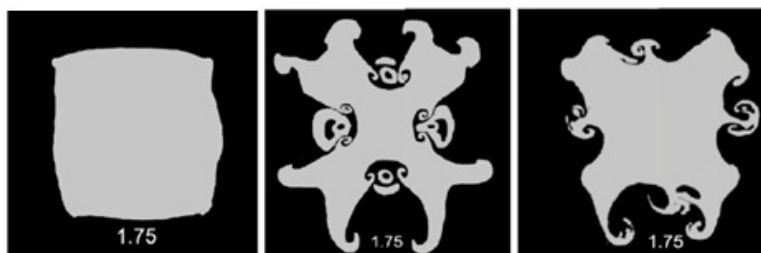


รูปที่ 2.24 แสดงแผนภาพของปากทางออกที่มีการติด tabs [19]

จากการทดลองที่ระยะ $x/D_H = 0.25, 0.75, 1.25$ ความปั่นป่วนยังไม่ค่อยเกิดขึ้น โดยจะเริ่มเกิดขึ้นที่ระยะ $x/D_H = 1.75$ และเมื่อพิจารณาที่ระยะ $x/D_H = 1.75$ ดังแสดงรูปที่ 2.25 ความปั่นป่วนแบบติด tabs 45° จะมีขนาดมากกว่าแบบ 135° อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเปรียบเทียบความเร็วของ steamwise ทั้ง 3 กรณี คือ ไม่ติด tabs, ติด tabs ทำมุมเอียง 45° และ 135° พบว่าลักษณะของ steamwise ที่เกิดจาก tabs ทำมุมเอียง 45° จะมีความเร็วสูงที่สุดที่ระยะห่างจากปากทางออกของท่อเจ็ทประมาณ $2.5D_H$ และเมื่อพิจารณาความปั่นป่วนพบว่า tabs ทำมุมเอียง 45° จะเกิดความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท $3.0D_H$ แสดงให้เห็นว่าความเร็วของ steamwise ที่มากที่สุดจะทำให้เกิดความปั่นป่วนที่ระยะห่างจากปากทางออกของท่อเจ็ทน้อยที่สุด



No tabs

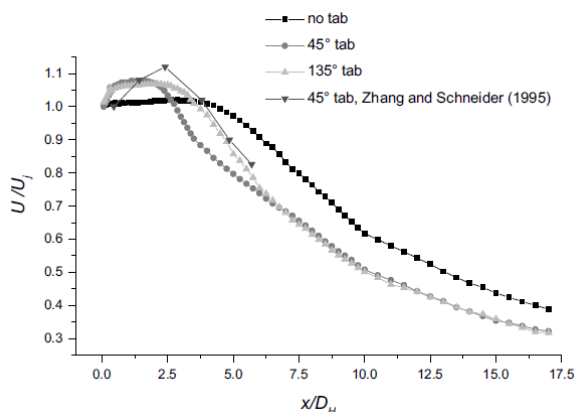


No tabs

45°

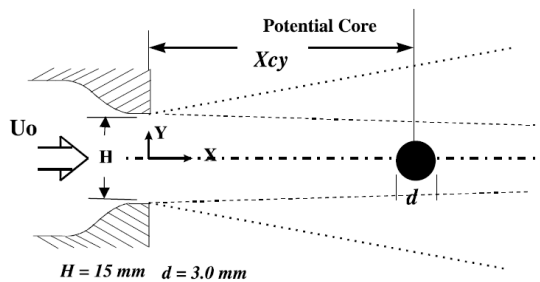
135°

รูปที่ 2.25 แสดงผลจากการทดลองทั้ง 3 กรณีที่ระยะ $x/D_H = 1.75$ [19]

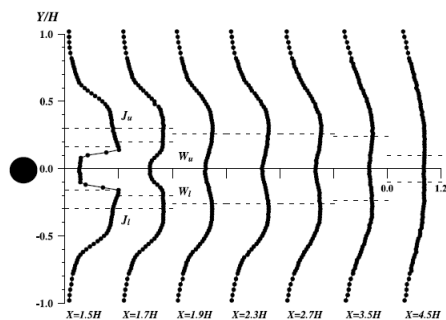


รูปที่ 2.26 แสดงผลความเร็วจากการทดลองทั้ง 3 กรณี [19]

Ya-Wen Chou และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางกรไหลของเจ็ทอากาศ ที่ไหลผ่านแท่งทรงกระบอกขนาดเล็ก โดยความเร็วของเจ็ทเท่ากับ 10 m/s ใช้ hot-wire probes ในการบันทึกความเร็วของเจ็ทในแต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 2.27 แสดงโมเดลที่ใช้ในการทดลอง [20]



รูปที่ 2.28 แสดงรูปแบบความเร็วของ streamwise ที่ระยะห่างด้านหลังแท่งทรงกระบอกแต่ละตำแหน่ง [20]

ผลดังรูปที่ 2.28 เมื่อเจ็ทผ่านแท่งทรงกระบอกเกิดการแยกตัวของลำเจ็ทเป็น 2 ส่วนที่ระยะใกล้แท่งทรงกระบอก ทำให้ความเร็วมีค่าสูงสุดที่ค่า J_U และ J_L ส่วนความเร็ว W_U และ W_L ที่บริเวณ $Y/H=0$ จะมีค่าต่ำ แต่เมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้น ลำเจ็ทที่แยกตัวกันในตอนแรกจะค่อยๆ รวมตัวกันอีกครั้งทำให้ความเร็ว W_U และ W_L บริเวณ $Y/H=0$ มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อระยะห่าง $X=4.5H$ จะพบว่าความเร็วตรงกลางที่ $Y/H=0$ จะมีความเร็วสูงสุด

2.8 กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากการทบทวนเอกสารที่ผ่านมาสรุปลงได้ดังนี้

1. เมื่อเจ็ทมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงขึ้นทำให้ระยะห่างที่เกิดความปั่นป่วนจากปากทางของเจ็ทมีค่าน้อยลง

2. จากการติดตั้ง tabs โดยเจ็ทอากาศที่ปากทางออกมีการผสมกับอากาศรอบๆ ได้ดีกว่าแบบไม่ติด tabs เพื่อสร้างความปั่นป่วนที่ปากทางออกมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น โดยจากที่ทบทวนเอกสาร จำนวน tabs ที่ติดตั้งมากส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะมีค่าสูง

3. เมื่อลำเจ็ทไหลผ่านแท่งทรงกระบอกจะเกิดการแยกตัวของลำเจ็ทเป็น 2 ส่วน และเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นลำเจ็ททั้ง 2 ส่วนที่แยกตัวนั้นจะเกิดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้ง ซึ่งในกรณีลำเจ็ทไหลผ่านแท่งกลมทรงกระบอกจะเกิดการแยกตัวความเร็วของเจ็ทในขณะนี้จะมีความเร็วสูงมากสามารถนำจุดเด่นตรงนี้ไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการระบายความร้อน เมื่อเทียบกับท่อเจ็ทแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อย และกรณีเจ็ทแบบท่อเปล่า เพื่อดูประสิทธิภาพการระบายความร้อนในแต่ละแบบ

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

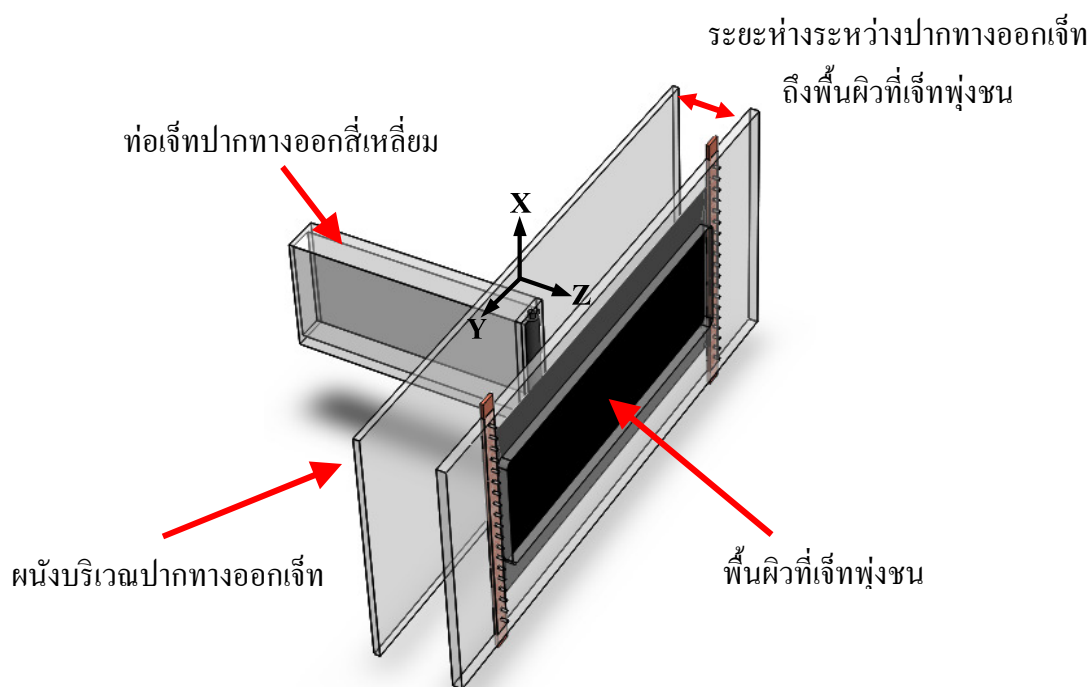
ในบทที่ 3 จะแสดงถึงรายละเอียดในการออกแบบของชุดทดลองและตัวแปรสำคัญในการทดลอง ซึ่งจะแสดงถึงรายละเอียดของระบบพิกัดที่ใช้อ้างอิงในการทดลอง จะมีการแบ่งการทดลองออกเป็นส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วนด้วยกัน โดยในส่วนแรกเป็นการศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชนจากเจ็ทที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งใช้กล้องอินฟราเรดในการเก็บบันทึกการกระจายบนพื้นผิว ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาถึงลักษณะของการกระจายตัวของความเร็ว และความปั่นป่วนของเจ็ทที่มีการไหลแบบอิสระ และในที่สุดท้ายเป็นส่วนของการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวโดยใช้วิธีเชิงทัศนศึกษา เพื่อดูพฤติกรรมและลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำที่บริเวณตำแหน่งปากทางออกเจ็ทเพื่อนำข้อมูลผลการศึกษาทั้งหมดมาอธิบายเป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เกิดขึ้น

3.1 การออกแบบและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.1 แสดงถึงการออกแบบชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา กำหนดให้หน้าตัดต่อเจ็ทแบบสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง $W=40$ mm และความสูง 170 mm โดยมีการติดตั้งชุดปรับแต่งที่บริเวณปากทางออกเป็น 3 กรณีคือ ติดตั้งแท่งทรงกระบอก ติดตั้งแผ่นกั้นรูปพื้นเอียง และปากทางออกแบบเจ็ทที่ปกติ โดยการทดลองได้กำหนดให้พื้นที่ของการไหลบริเวณปากทางออกเท่ากันทั้ง 3 กรณี สำหรับระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ใช้ในการทดลองได้กำหนดให้อยู่ในช่วง $H=2W$ $4W$ $6W$ และ $8W$ ตามลำดับ ในทุกการทดลองได้กำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทคงที่ โดยเทียบกับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทกรณีที่ไม่มีการติดตั้งแท่งขวางการไหลที่ $Re=15,000$ ซึ่งในการศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวได้ใช้กล้องอินฟราเรดบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่กระจายบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพเพื่อหาน้ำสเกลต์นัมเบอร์ที่กระจายตัวบนพื้นผิว

3.2 ระบบพิกัดที่ใช้อ้างอิงและรูปแบบปากทางออก

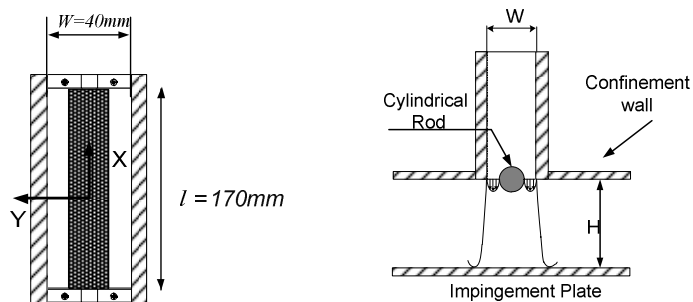
ระบบพิกัดที่ใช้อ้างอิงของการทดลองนี้ได้กำหนดเป็นแบบระบบแกน (Cartesian coordinate system) ที่ใช้อ้างอิงในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบชุดทดลองและระบบพิกัดที่ใช้ในการศึกษา โดยจะประกอบด้วยระบบพิกัด แบบ X, Y และ Z ซึ่งจะกำหนดให้จุดเริ่มต้นอยู่ที่กึ่งกลางของปากทางออกของท่อขยายหน้าตัด กำหนดให้แกน Z มีทิศทางไปตามทิศทางการไหลของลำเจ็ท โดยจะมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบ XY ให้แกน X มีทิศทางพุ่งขึ้นตั้งฉากกับทิศทางการไหลของลำเจ็ท และระนาบ XY เป็นระนาบของปากทางออกเจ็ท และพื้นผิวที่ลำเจ็ทพุ่งชน



รูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบชุดทดลองและระบบพิกัดที่ใช้ในการศึกษา

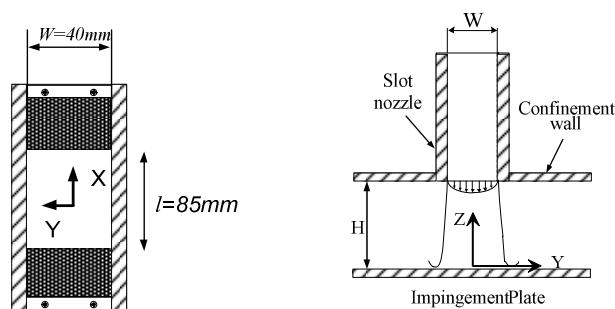
ในการศึกษาได้ติดตั้งชุดปรับแต่งที่บริเวณปากทางออกของท่อเจ็ทเพื่อสร้างความปั่นป่วนของลำเจ็ท โดยจะมีการติดตั้งเป็น 3 ลักษณะดังนี้

(1) ติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ทำมาจากแท่งสแตนเลส ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=0.5W$ ซึ่งจะนำแท่งทรงกระบอกมาติดตั้งที่ปากทางออกในทิศทางแนวตั้ง เพื่อสร้างความปั่นป่วนให้ลำเจ็ทเมื่อไหลผ่านแท่งทรงกระบอก ดังแสดงรูปที่ 3.2



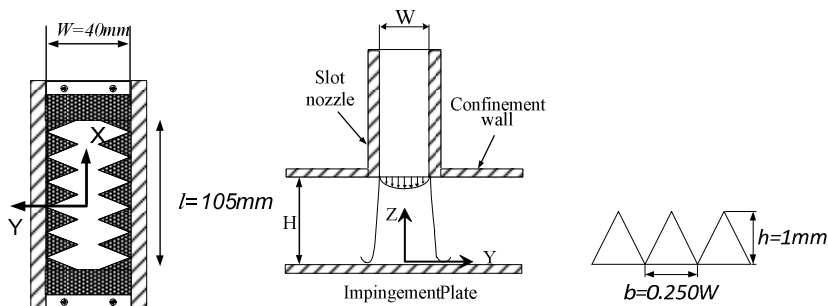
รูปที่ 3.2 รูปแบบปากทางออกเจ็ทกรณีเจ็ทท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอก

(2) กรณีเจ็ทท่อแบบปากทางออกปกติ จะมีการติดตั้งแผ่นอะทิลิกเป็นแนวยาวทั้งด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง เพื่อให้พื้นที่ปากทางออกของเจ็ทมีขนาดเท่ากับการทดลองแบบอื่น เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับการปรับแต่งที่บริเวณปากทางออกกับแบบอื่น ดังแสดงรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบปากทางออกเจ็ทกรณีท่อแบบปากทางออกปกติ

(3) ติดตั้งแผ่นกั้นบริเวณปากทางออกมีลักษณะเป็นรูปฟันเลื่อย ซึ่งได้กำหนดขนาดความยาวของฐานซี่ฟันปลา (b) เท่ากับ $0.250W$ โดยที่ระยะความสูงของซี่ฟันปลาถูกกำหนดไว้ที่ $h=1\text{mm}$ ดังแสดงรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปแบบปากทางออกเจ็ทกรณีเจ็ทท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อย

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดต่างๆของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง โดยที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ที่ใช้ในการทดลองได้กำหนดค่าให้อยู่ในช่วงการไหลของเจ็ทปั่นแบบปั่นป่วนเพียงค่าเดียว เนื่องจากในการทดลองของงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาผลของตัวแปรเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของเจ็ทเมื่อมีการเพิ่มหรือลด แต่ได้ศึกษาผลของอิทธิพลของการปรับแต่งที่บริเวณปากทางออกในการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมพุ่งชน

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

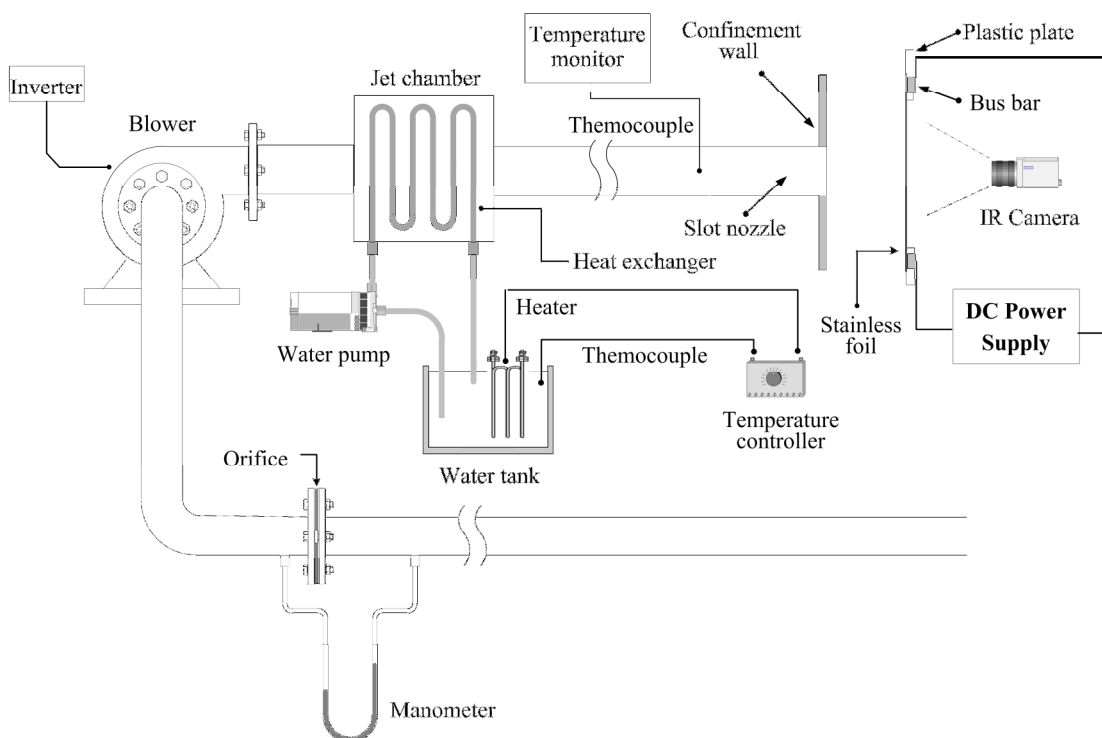
ลักษณะชุดปรับแต่งที่ปากทางออก	แท่งทรงกระบอก ท่อเปล่า สี่เหลี่ยม
ขนาดความกว้างของท่อเจ็ท (W)	40 mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งกัน	20 mm
พื้นที่ปากทางออกของท่อเจ็ท	3400 mm ²
อุณหภูมิเจ็ท (T _j)	25°C
ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Re)	15,000
ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H)	2W, 4W, 6W และ 8W

3.3 การศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

3.3.1 อุปกรณ์ของชุดทดลอง

อุปกรณ์ของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชนจากท่อน้ำตัดแบบสี่เหลี่ยม โดยได้แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว มีดังนี้

(1) ออร์ริฟิซ (Orifice) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของอากาศที่ไหลในท่อ แผ่นออร์ริฟิซทำมาจากหน้าแปลนที่มีการเจาะรูตรงกลางซึ่งขนาดของรูที่เจาะจะมีขนาดอ้างอิงมาจากขนาดของท่อ แผ่นออร์ริฟิซจะอยู่ระหว่างชุดตัวเรือนออร์ริฟิซซึ่งจะติดตั้งไว้ระหว่างท่อที่มีอากาศไหลผ่าน เมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นออร์ริฟิซจะทำให้ความดันลดลง (Pressure drop) และมีการเจาะช่องที่ด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นออร์ริฟิซ เพื่อเป็นช่องทางในการวัดความดันที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะใช้ชุดமானอมิเตอร์ที่มีการบรรจุน้ำเป็นของสารตัวกลางในการวัดความดัน



รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

(2) โบลเวอร์ (Blower) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันของอากาศในท่อทำให้เกิดการไหลขึ้นในระบบ ซึ่งต้นกำลังของชุดโบลเวอร์จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสที่มีขนาด 2,000 W เป็นตัวขับเคลื่อนชุดใบพัดของโบลเวอร์ โดยในการทดลองนี้จะมีการควบคุมอัตราการไหลของอากาศซึ่งจะใช้ชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการควบคุมความเร็วรอบของโบลเวอร์เพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่กำหนดไว้

(3) ชุดฮีตเตอร์และชุดควบคุมอุณหภูมิของอากาศ (Heater and temperature controller) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทให้คงที่โดยจะใช้น้ำที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิคงที่ไหลผ่านชุด Heat exchanger เพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนในชุดห้องลม (Jet chamber) โดยในการทดลองจะกำหนดให้อุณหภูมิของเจ็ทอากาศเท่ากับ $25.0 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$

(4) ท่อเจ็ทหน้าตัดสี่เหลี่ยม (Slot nozzle) ทำมาจากแผ่นพลาสติกใสที่มีความหนา 10mm และ 15mm โดยที่ตำแหน่งปากทางออกของท่อเจ็ทในขณะที่มีการปรับแต่งที่ปากทางออกจะมีขนาดความกว้าง (W) เท่ากับ 40 mm และความยาวเท่ากับ 170 mm

(5) ชุดพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (Jet impingement wall) ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนประกอบด้วย แผ่นสแตนเลสบางที่มีความหนา 0.030 mm

สำหรับใช้เป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งจะติดตั้งอยู่บนชุดจับยึดที่ทำจากแผ่นพลาสติกหนา 15 mm บริเวณตรงกลางจะเจาะช่องหน้าต่างขนาด 640mm x 270mm ไว้กลางแผ่น สำหรับวัดอุณหภูมิและ จึงแผ่นสแตนเลสให้เรียบและตึงด้วยแท่งทองแดงทั้งสองฝั่ง ในการทดลองการถ่ายเทความร้อนบน พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงผ่านแท่งทองแดงเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แผ่นสแตนเลสได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว ซึ่งแผ่นสแตนเลสด้านที่ใช้กล้องทางความร้อน บันทึกภาพนั้นจะมีการพ่นสีดำโดยกำหนดค่า Emissivity=0.99



รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของผนังที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว

(6) ชุดอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายไฟกระแสตรง (DC) ให้กับแผ่นสแตนเลสที่ชุดพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อให้เกิดฟลักซ์ความร้อนขึ้น โดยสามารถจ่ายค่าของกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 50 A และค่าของแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 15 V โดยจะทำการวัดแรงดันทางไฟฟ้าและกระแสทางไฟฟ้าเพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว

(7) กล้องบันทึกภาพทางความร้อนแบบอินฟราเรด (Infrared camera) สามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดจุดของภาพ 640×480 จุด เป็นกล้องบันทึกภาพทางความร้อนรุ่น Testo 882 โดยจะมีช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ที่ -20°C ถึง 100°C ซึ่งมีค่าของความผิดพลาดอยู่ที่ ±2 โดยจะใช้ร่วมกับ Software เพื่อนำข้อมูลภาพทางความร้อนที่กล้องบันทึกไปแปลงเป็นข้อมูลแบบตารางเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์

3.3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลอง อากาศภายในห้องทดลองจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่ จะถูกดูดผ่านออร์ริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าไปในระบบ โดยใช้โบรเวอร์ ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ โดยการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดโบรเวอร์ด้วยอินเว

เตอร์ หลังจากนั้นอากาศจะไหลเข้าไปห้องกักอากาศ ซึ่งภายในจะมีชุดท่อขดความร้อนซึ่งติดตั้งอยู่ โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทอากาศให้คงที่ ก่อนที่จะผ่านไปยังท่อเจ็ทที่มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม หลังจากเจ็ทพุ่งชนผนังแล้ว เจ็ทจะไหลออกทางด้านข้างในช่องระหว่างผนังของท่อเจ็ทและผนังที่เจ็ทพุ่งชน

สำหรับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$Re = \frac{W\bar{V}_j}{\nu} \quad (3.1)$$

โดยที่ W คือ ขนาดความกว้างของท่อเจ็ท
 \bar{V}_j คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อเจ็ท
 (คำนวณจากอัตราการไหลของเจ็ทหารด้วยพื้นที่ปากทางออกเจ็ท)
 ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ

ในส่วนของการทดลองจะใช้เจ็ทอากาศอุณหภูมิที่มีการควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ $25 \pm 0.2^\circ\text{C}$ พุ่งชนพื้นผิวสเตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อนซึ่งค่าฟลักซ์ความร้อนเกิดจากการจ่ายกระแสไฟยังแผ่นสเตนเลสมีการวัดค่ากระแสและค่ากำลังทางไฟฟ้าเพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการเกิดความร้อนบนแผ่นสเตนเลส หลังจากเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจะเกิดการระบายความร้อนขึ้นบนแผ่นสเตนเลส และรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) จึงทำการบันทึกค่าการกระจายอุณหภูมิตั้งบนพื้นผิวแผ่นสเตนเลสด้านตรงข้ามที่เจ็ทพุ่งชน โดยใช้กล้องตรวจจับความร้อนอินฟราเรด (Infrared camera) บันทึกภาพทางความร้อน ซึ่งจะทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งบนแผ่นสเตนเลสใน 2 กรณีคือ กรณีที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อนและกรณีไม่จ่ายฟลักซ์ความร้อนเพื่อนำผลไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ดังสมการที่(3.2)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{lossed}}{T_w - T_{aw}} \quad (3.2)$$

โดยที่อัตราการเกิดความร้อน (\dot{q}_{input}) คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (3.3)$$

โดยที่ I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส, A
 V คือ ค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่วัดจากแท่งทองแดง, Volt
 A คือ พื้นที่ของแผ่นสแตนเลสที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน, m^2

ในส่วนของการคำนวณการสูญเสียความร้อนด้านหลังของแผ่นสแตนเลส โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสี สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{\text{lossed}} = \dot{q}_{\text{lossed, convection}} + \dot{q}_{\text{lossed, radiation}} \quad (3.4)$$

พลักซ์ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติคำนวณได้จาก

$$\dot{q}_{\text{convection}} = h_c (\bar{T}_w - T_s) \quad (3.5)$$

$$h_c = \frac{Nu_L k}{L} \quad (3.6)$$

$$L = \frac{W_{st} L_{st}}{[(W_{st}^2) + (L_{st}^2)]} \quad (3.7)$$

ค่าตัวเลขคอร์เรลชันเบอร์ กรณีแผ่นเรียบบางแนวตั้งคำนวณได้จาก

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (3.8)$$

$$Ra_L = \frac{g \beta (\bar{T}_w - T_s) L^3}{\nu \alpha} \quad (3.9)$$

พลักซ์ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนคำนวณได้จาก

$$\dot{q}_{\text{radiation}} = \sigma \varepsilon (\bar{T}_w^4 - T_s^4) \quad (3.10)$$

- โดยที่ g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2
- h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามธรรมชาติ
- k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิ 25°C [21]
- L คือ ค่าความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) ของพื้นผิว
- L_{st} คือ ความยาวของแผ่นสเตนเลสเท่ากับ 0.64 m
- Nu_L คือ ค่านัสเซลท์นัมเบอร์ที่สูญเสียบนแผ่นเทอร์โมลิวคิวิตีคริสตัล
- Pr คือ ค่า Prandtl number
- Ra_L คือ ค่า Rayleigh number
- T_{aw} คือ อุณหภูมิแต่ละจุดบนแผ่นสเตนเลสที่ไม่มีฟลักซ์ความร้อน
- T_s คือ อุณหภูมิบรรยากาศโดยรอบ
- T_w คือ อุณหภูมิแต่ละจุดบนแผ่นสเตนเลสที่มีฟลักซ์ความร้อน
- \bar{T}_w คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีฟลักซ์ความร้อน
- W_{st} คือ ความกว้างของแผ่นสเตนเลสเท่ากับ 0.27 m
- α คือ ค่าความแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)
- β คือ $1/(T_s+273)$ คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนเชิงปริมาตร
(Volumetric thermal expansion coefficient (K^{-1}))
- \mathcal{E} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผิวสเตนเลส มีค่าเท่ากับ 0.99 [22]
- ν คือ ค่าความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity)
- σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์มานน์ เท่ากับ $5.670373 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

ค่านัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทไหลปะทะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hW}{k} \quad (3.11)$$

ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}W}{k} \quad (3.12)$$

$$\overline{h} = \frac{q_{input} - \sigma\varepsilon(\overline{T}_w^4 - T_s^4) - h_c(\overline{T}_w - T_s)}{\overline{T}_w - T_s} \quad (3.13)$$

โดยที่ \overline{h} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

3.3.3 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลปะทะด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางความร้อน

ค่ากระจายของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหรือค่านัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสามารถหาได้โดยการนำภาพถ่ายที่ได้จากกล้องอินฟราเรด ซึ่งจะทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นสแตนเลสใน 2 กรณีคือ กรณีที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อนและกรณีไม่จ่ายฟลักซ์มาวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมที่เขียนในซอฟต์แวร์ MATLAB โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางความร้อนมีรายละเอียดดังนี้

(1) เลือกภาพถ่ายทางความร้อนที่ได้จากกล้องอินฟราเรด (Infrared camera) ในกรณีที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อนและกรณีไม่จ่ายฟลักซ์มาใช้ในการวิเคราะห์อย่างละ 10 ภาพ

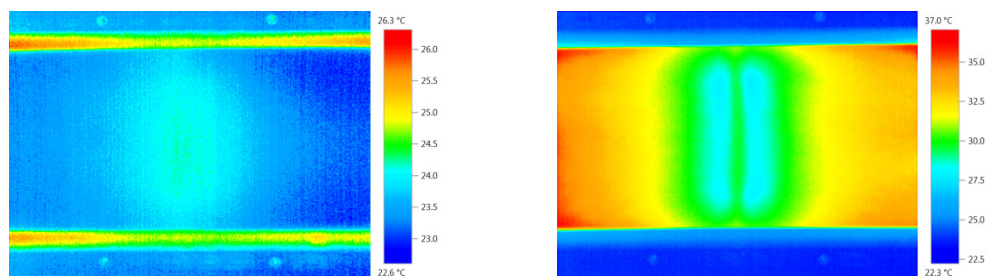
(2) แปลงไฟล์ภาพถ่ายทางความร้อนเป็นไฟล์ตาราง (Excel) โดยใช้โปรแกรมกล้องอินฟราเรด Testo (IR Soft)

(3) โหลดข้อมูลไฟล์ตารางที่ต้องการวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรม MATLAB

(4) ตัดรูปให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการวิเคราะห์

(5) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยใช้สมการ 3.2 และคำนวณหาค่านัสเซลต์นัมเบอร์ที่กระจายทั่วทั้งพื้นผิว ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการ 3.11 ซึ่งตัวอย่างของผลการวิเคราะห์นัสเซลต์นัมเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

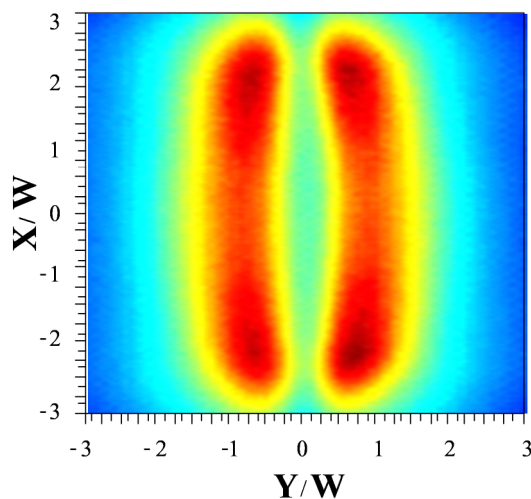
นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยและนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย โดยสามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน จากสมการ 3.12 และ 3.13



(ก) ภาพถ่ายทางความร้อนในกรณีไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน

(ข) ภาพถ่ายทางความร้อนในกรณีที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อน

รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนที่ได้จากกล้องอินฟราเรดในกรณีที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อนและกรณีไม่จ่ายฟลักซ์ที่ได้จากกล้องอินฟราเรด

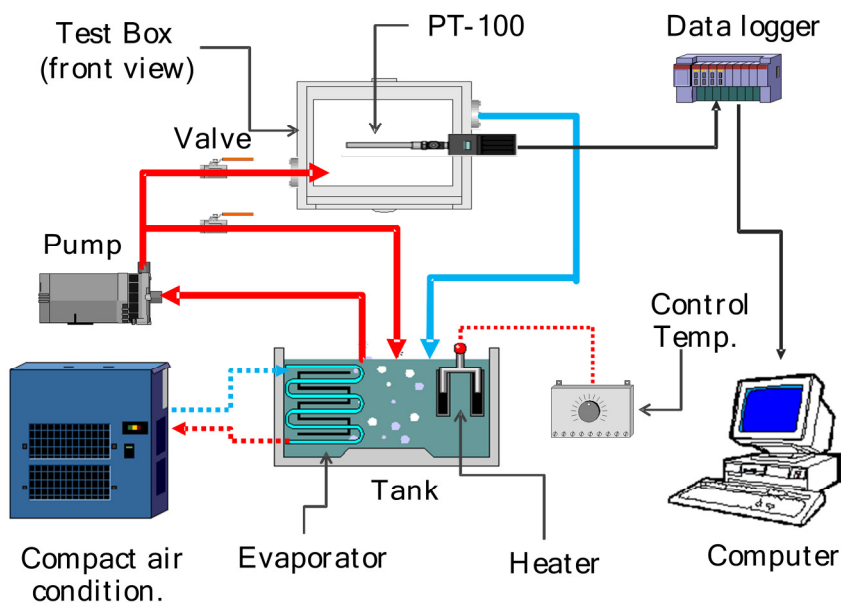


รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการหาค่าการกระจายตัวของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม MATLAB

3.3.4 การสอบเทียบกล้องอินฟราเรด

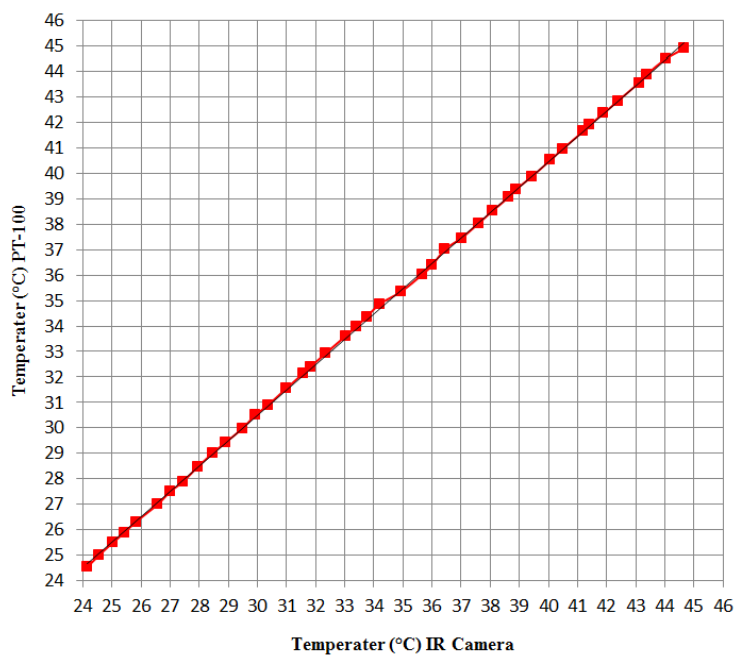
กล้องอินฟราเรด(Infrared camera) มีหลักการทำงานคือจะบันทึกภาพถ่ายทางความร้อน ในกรณีที่จะใช้งานกล้องอินฟราเรดมีความจำเป็นต้องทำการสอบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก

กล้องอินฟราเรดก่อนการใช้งานเพื่อทราบถึงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของกล้องและนำข้อมูลนี้ไปใช้อ้างอิงกับผลการทดลอง โดยจะใช้หลักของการถ่ายภาพทางความร้อนเพื่อเทียบค่าความร้อนที่กล้องวัดได้กับอุปกรณ์วัดค่าความร้อนมาตรฐาน โดยในการสอบเทียบนี้จะใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ PT-100 ซึ่งมีค่าความแม่นยำที่สูงเป็นอุปกรณ์สอบเทียบ โดยมีวิธีการสอบเทียบดังนี้



รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ชุดทดลองที่ใช้ในสอบเทียบกล้องอินฟราเรด

กล้องสำหรับสอบเทียบทำมาจากพลาสติกใสด้านหน้ามีการเจาะช่องว่างเพื่อติดตั้งแผ่นสแตนเลสบางเพื่อใช้กล้องอินฟราเรดในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางความร้อน มีการเจาะท่อทางน้ำเข้าและน้ำออกและเจาะช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลแบบ PT-100 เพื่อใช้ในการสอบเทียบ โดยเทอร์โมคัปเปิลแบบ PT-100 จะต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data logger) เพื่อนำอุณหภูมิช่วงที่ทำการถ่ายภาพมาเปรียบเทียบเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในลำดับต่อไป โดยสารตัวกลางที่ใช้ทดสอบคือน้ำที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในการทดลอง ซึ่งอุณหภูมิในการสอบเทียบนั้นมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิในการทดลองอยู่ในช่วง 24-45°C ซึ่งผลจากการสอบเทียบกล้องอินฟราเรดดังแสดงในรูปที่ 3.10

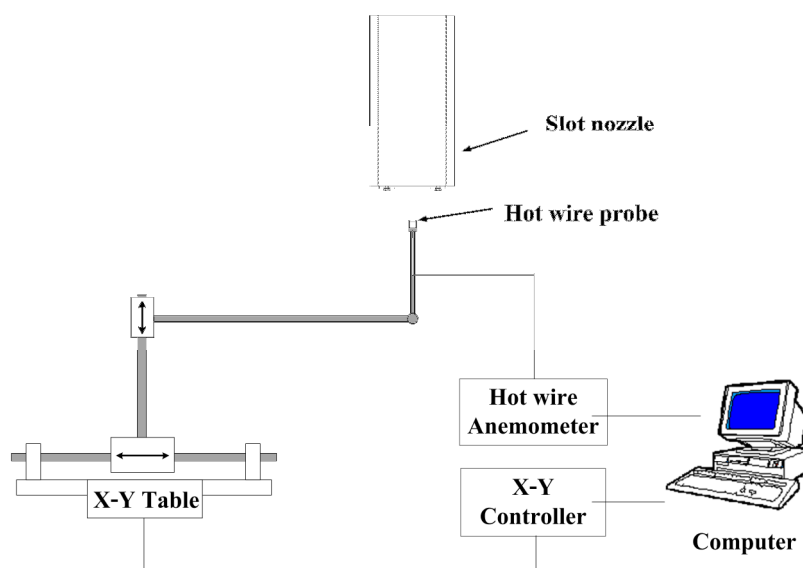


รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจากกล้องอินฟราเรด และเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ PT-100

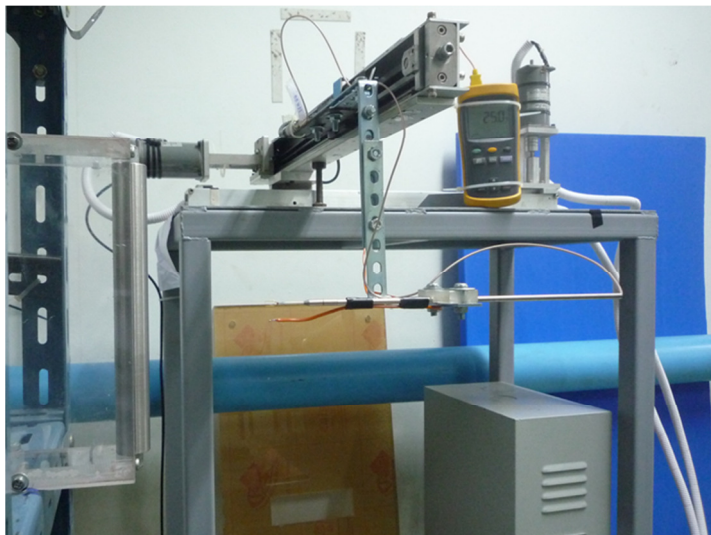
3.4 การศึกษาลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ

3.4.1 รายละเอียดของชุดทดลอง

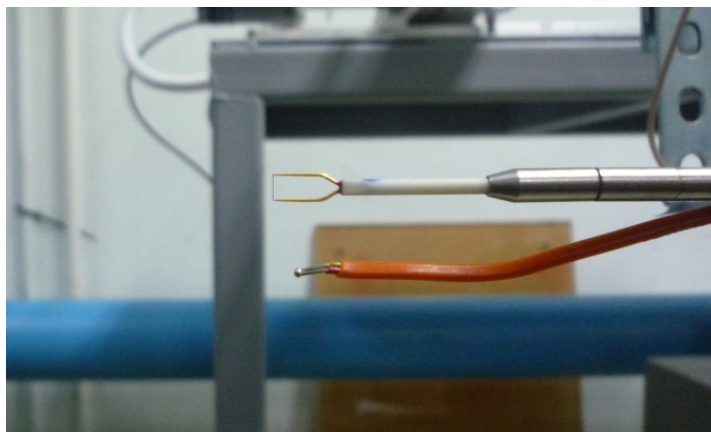
รูปที่ 3.11 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะของการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ ได้ทำการติดตั้งหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot wire probe) ดังรูปที่ 3.13 ยี่ห้อ Dantec dynamics รุ่น 55B01 ซึ่งเส้นลวดร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $5\ \mu\text{m}$ และมีความยาว $1.25\ \text{mm}$ โดยมีช่วงความเร็วในการวัดตั้งแต่ $0.05\ \text{m/s} - 500\ \text{m/s}$ มีความถี่ใช้งานสูงสุด $400\ \text{kHz}$ ในการทดลองได้ติดตั้งบนชุดควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D Transverse table) ดังรูปที่ 3.14 โดยหัววัดแบบลวดร้อน (Hot wire probe) จะต่อกับเครื่องวัดความเร็วลมแบบอนุกรมคงที่ (Mini Constant temperature anemometer, MiniCTA) ยี่ห้อ Dantec dynamic รุ่น 54T30 โดยมีหน้าที่แปลงค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดแบบลวดร้อน (Hot wire probe) เป็นค่าความเร็ว และจะทำการบันทึกข้อมูลด้วยตัวเก็บข้อมูล (Data acquisition system, DAQ) ยี่ห้อ National instrument measurement รุ่น NI 9215 with BNC ซึ่งค่าความเร็วเจ็ทในการทดลองจะถูกบันทึกลงบน คอมพิวเตอร์ที่ทำการต่ออุปกรณ์



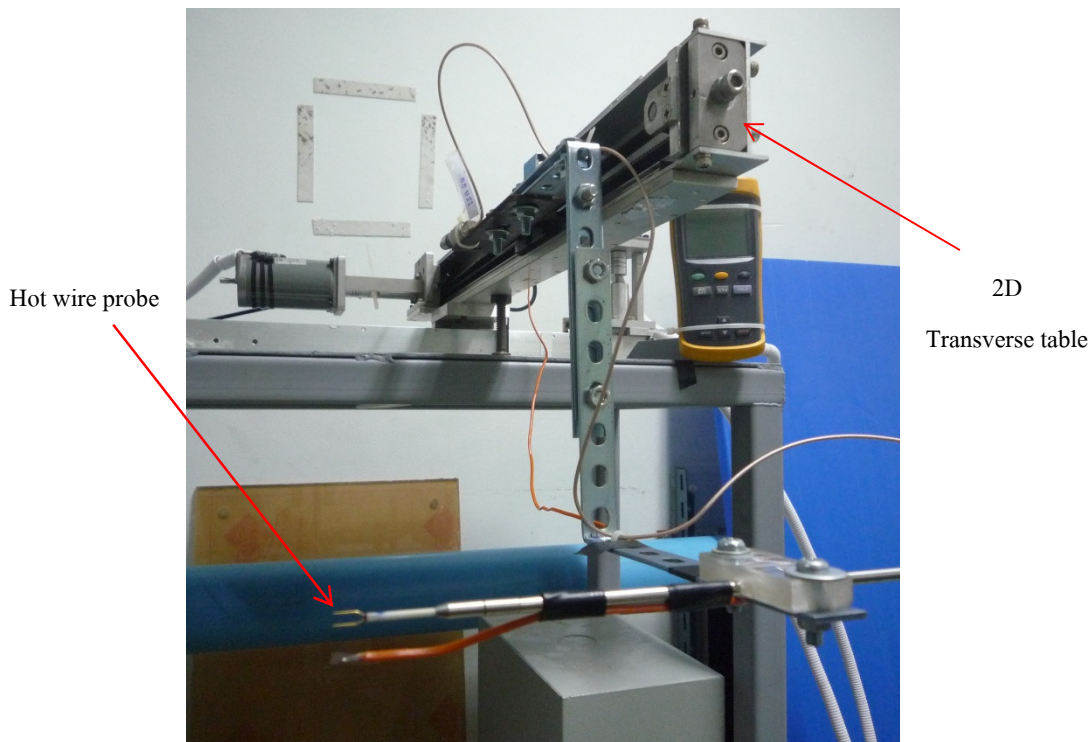
รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ



รูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างระยะห่างในการติดตั้งหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน



รูปที่ 3.13 แสดงอุปกรณ์หัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot wire probe)



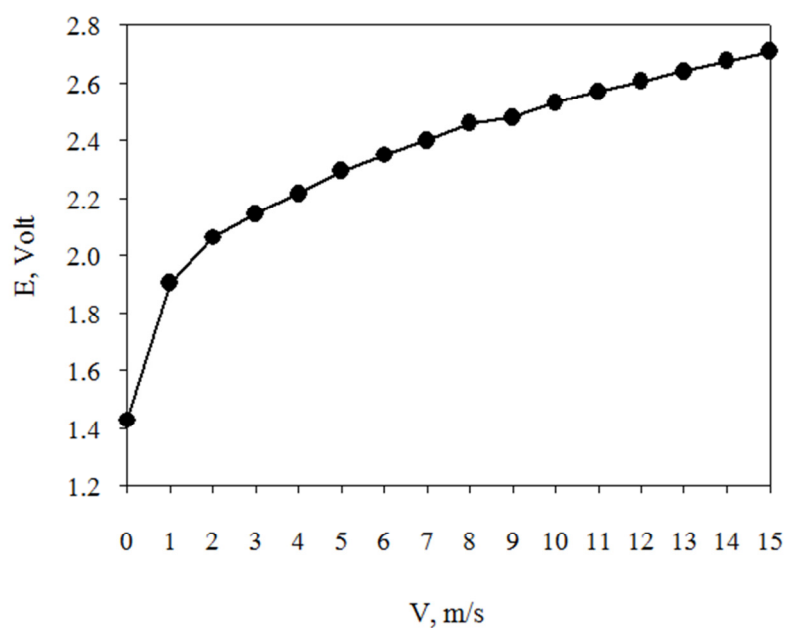
รูปที่ 3.14 แสดงชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D Transverse table)

3.4.2 การสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน

หัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot-wire probe) มีหลักการทำงานคือจะมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (E) เข้าไปที่เส้นลวด ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่เส้นลวดในกรณีที่เส้นลวดร้อนและไม่มีกระแสของลมพัดผ่านลวด แรงดันไฟฟ้าที่มาที่เส้นลวดจะต่ำ และเมื่อค่าความร้อนคงที่ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 0 V. ในขณะเดียวกันเมื่อมีกระแสของลมพัดผ่านเส้นลวดทำให้ค่าความร้อนของเส้นลวดลดลงจึงต้องมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่เส้นลวดมีค่าสูงขึ้น

ในกรณีที่จะใช้งานหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อนจึงมีความจำเป็นต้องทำการสอบเทียบความเร็วลมกับหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อนก่อนใช้งาน โดยจะมีอุปกรณ์วัดความเร็วลม (Pitot-static tube) ต่อเข้ากับமானอมิเตอร์แบบเอียงเพื่อวัดผลต่างความของดันและนำไปคำนวณหาความเร็วเพื่อใช้ในการสอบเทียบในการทดลองจริง โดยในการติดตั้งหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อนและ Pitot-static tube ในการสอบเทียบนั้น จะติดตั้งกับชุดจับยึดเพื่อไม่ให้มีการเคลื่อนที่ของหัววัด และตำแหน่งที่ใช้สอบเทียบคือตำแหน่งตรงกลางของท่อเจ็ท ซึ่งเป็นตำแหน่งที่

มีความเร็วของเจ็ทที่สูงที่สุด ในการเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลของโปรแกรม (Sample of frequency) ที่ 1 kHz และเก็บตัวอย่างของข้อมูล (Number of samples) เท่ากับ 20,000 ค่า โดยได้มีการกำหนดช่วงความเร็วอยู่ในช่วง 0 -15 m/s และอุณหภูมิของเจ็ท 25°C ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ในการทดลอง โดยห่าวัดความเร็วแบบลวดร่อนวัดสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเจ็ทและแรงดันไฟฟ้า



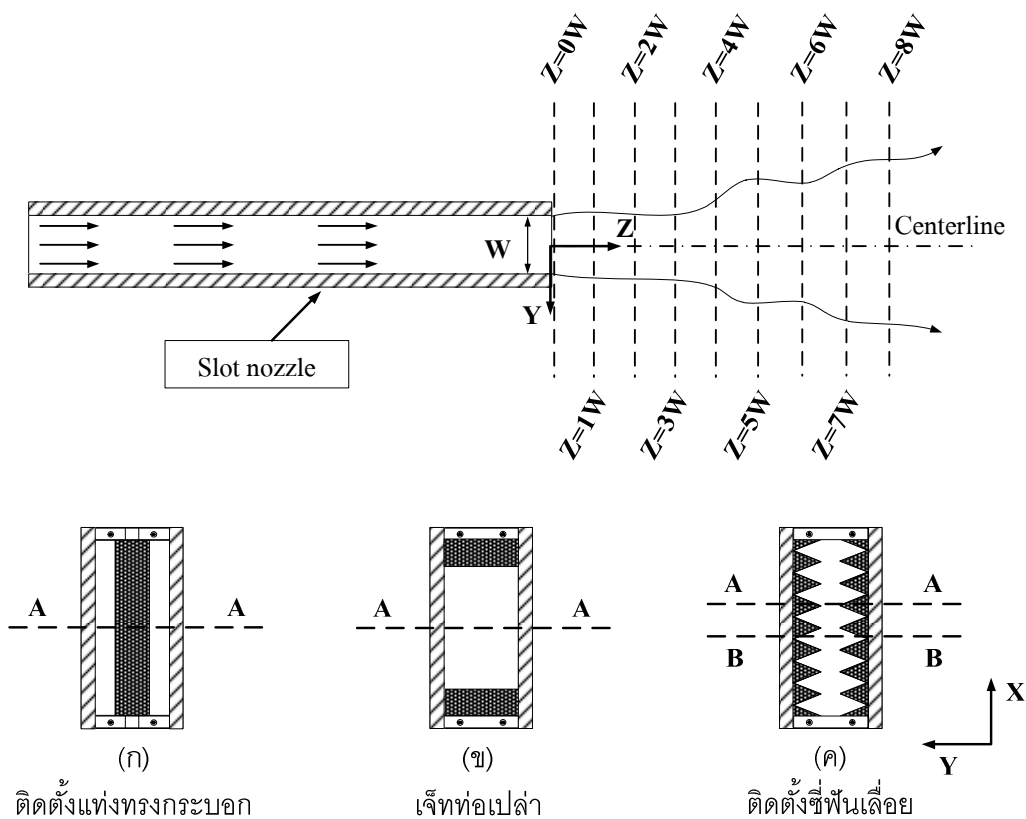
รูปที่ 3.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเจ็ทและแรงดันไฟฟ้า

ผลการสอบเทียบความเร็วของห่าวัดความเร็วแบบลวดร่อนจะได้สมการทำนายความเร็วดังนี้

$$E = -0.000007V^6 + 0.0004V^5 - 0.0075V^4 + 0.0798V^3 - 0.4508V^2 + 1.346V + 0.4654 \quad (3.14)$$

3.4.3 วิธีการทดลอง

สำหรับการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ (Free jet) จะควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทให้คงที่ที่อุณหภูมิ 25°C และเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) คงที่เท่ากับ 15,000 ซึ่งเป็นค่าเดียวกับการทดลองการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ท โดยกำหนดตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทรูปที่ 3.16 ตามแนวแกน 2 แกน คือตามแนวแกน Y โดยเริ่มต้นที่ตำแหน่งตรงกลางปากทางออกเจ็ท (Y=0) ในทิศทางด้านบวกและลบ ซึ่งจะสิ้นสุดที่ค่าความเร็วลมที่วัดได้มีค่าเป็นศูนย์ และตามแนวแกน Z (Centerline) ที่ระยะห่างจากปากทางออกของท่อเจ็ทอยู่ในช่วงระยะ Z = 0W-8W ตามลำดับ โดยที่ ที่ระยะห่าง 0W จะเป็นค่าที่มีระยะห่างจากปากทางออกท่อเจ็ทเท่ากับ 1 mm ในการเก็บค่าความเร็วจากหัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot wire probe) จะใช้ชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D Transverse table) เคลื่อนที่ไป ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการวัด โดยให้มีการเคลื่อนที่ครั้งละ 1 mm และในการเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลของโปรแกรม (Sample of frequency) ที่ 1 kHz และเก็บตัวอย่างของข้อมูล (Number of samples) เท่ากับ 10,000 ค่า และนำข้อมูลการกระจายความเร็วที่ได้มาวิเคราะห์เพื่ออธิบายโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ



รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทอิสระ (Free jet)

สำหรับความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งใดๆ (\bar{V}) ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการต่อไปนี

$$\bar{V}_j = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (3.15)$$

โดยที่ V_i คือ ความเร็วที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ

N คือ จำนวนข้อมูล

สำหรับความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใดๆ (V'_i) คำนวณจากสมการต่อไปนี

$$V'_i = V_i - \bar{V} \quad (3.16)$$

สำหรับความเร็วเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใดๆ (V_{rms}) คำนวณจากสมการต่อไปนี

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V'_i)^2}{N}} \quad (3.17)$$

สำหรับความปั่นป่วน (Turbulence intensity, Tu) คำนวณจากสมการต่อไปนี

$$Tu = \frac{V_{rms}}{\bar{V}} \quad (3.18)$$

3.5 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำด้วยวิธีเชิงทัศน LIF (Laser Induced Fluorescent)

ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลจากการทดลองมาใช้ในการอธิบายโครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชน เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองการไหลของเจ็ทและอธิบายถึงโครงสร้างของเจ็ทที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในการทดลองการถ่ายเทความร้อน สำหรับช่วงความเร็วที่สามารถสังเกตลักษณะการไหลที่ชัดเจน

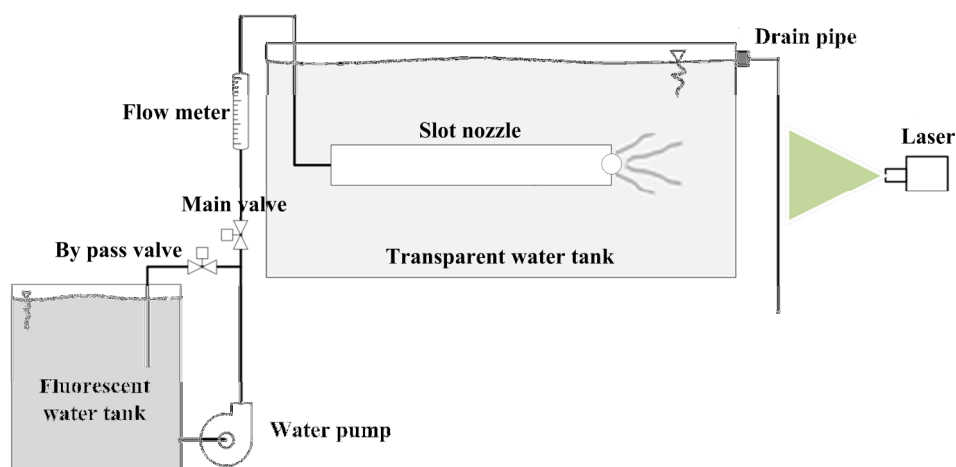
ของโครงสร้างเจ็ทเรย์โนลด์์นัมเบอร์มีค่าคงที่ ($Re=3,200$) โดยค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำได้แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำ

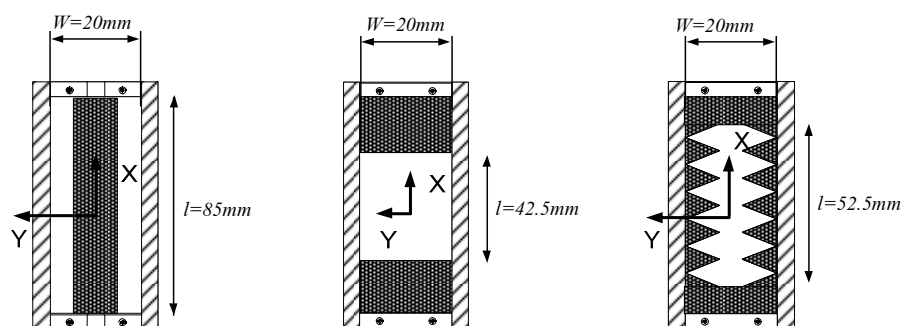
ลักษณะชุดปรับแต่งที่ปากทางออก	แท่งทรงกระบอก ท่อเปล่า ซี่ฟันเลื่อย
ขนาดความกว้างของท่อเจ็ท (W)	20 mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งกัน	10 mm
พื้นที่ปากทางออกของท่อเจ็ท	850 mm^2
ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Re)	$\approx 3,200$
ระยะจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H)	2W, 4W, 6W และ 8W

3.5.1 ชุดทดลอง

ดังรูปที่ 3.10 แสดงโมเดลชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิว โดยตู้น้ำ (Transparent water tank) ที่ใช้ในการศึกษาทำจากกระจกแก้วใสเพื่อให้สามารถสังเกตการไหลของเจ็ทน้ำได้ ตู้น้ำมีขนาดความกว้าง 80 cm ยาว 200 cm และสูง 80 cm ซึ่งจะเติมน้ำจนเต็มตู้ โดยในการทดลองนี้จะเริ่มต้นจากน้ำจะถูกดูดส่งจากถังเก็บน้ำสี (Fluorescent water tank) โดยใช้ปั๊มน้ำ (Water pump) ขนาด 370 W ไหลผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล (Main valve) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหล โดยจะทำการปรับอัตราการไหลไว้ที่ 0.1-1 แกลลอนต่ออนาที หลังจากนั้นน้ำจะไหลเข้าไปยังท่อเจ็ท ซึ่งจะมีการติดตั้งแผ่นตะแกรงและท่อขนาดเล็กที่ทางเข้า เพื่อกระจายน้ำที่เข้ามาให้มีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดก่อนที่จะไหลออกจากหัวฉีด (Slot nozzle) โดยความกว้างของท่อเจ็ทแบบปากทางออกสี่เหลี่ยม (W) ที่ใช้ในการทดลองเจ็ทน้ำจะมีขนาดเท่ากับ 20 mm ทำจากพลาสติกดังรูปที่ 3.18 และบันทึกภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลวิดีโออีพ็อก Nikon รุ่น D5000 ภาววิดีโอมีความละเอียดสูง 4,288x2,848 Pixels ที่ 30 เฟรมต่อวินาที



รูปที่ 3.17 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF)



รูปที่ 3.18 แสดงท่อปากทางออกหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีการปรับแต่งที่ปากทางออกที่ใช้ในการศึกษา ลักษณะการไหลด้วยวิธีเชิงทัศน (LIF)

3.5.2 วิธีการทดลอง

การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำไอสระด้วยวิธีเชิงทัศน ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งจะมีการผสมสาร Rhodamine B ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) ลงในถังน้ำ (Fluorescent water tank) โดยสาร Rhodamine B นี้จะมีคุณสมบัติในเรื่องการเรืองแสง หลังจากนั้นจะฉีดเจ็ทน้ำที่มีสารเรืองแสงลงไปในน้ำใส ที่อยู่ในตู้น้ำ (Transparent water tank) และใช้แสงเลเซอร์ส่องตัดผ่านตรงกลางของลำเจ็ท เพื่อดูโครงสร้างการไหลของเจ็ท ซึ่งชุดอาร์กอนเลเซอร์ (Argon laser) ที่ใช้ในการทดลองขนาด 500 mW ลำเจ็ทเมื่อกระทบกับแสงเลเซอร์จะเกิดการเรืองแสงขึ้นจึงสามารถมองเห็นลำเจ็ทได้อย่างชัดเจน และใช้กล้องดิจิทัลวิดีโอบันทึกภาพลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำไอสระ ซึ่งจะสามารถมองเห็นโครงสร้างการไหลของเจ็ทได้อย่างชัดเจน

บทที่ 4

การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็น การคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาของพลศาสตร์ของไหล ใช้จำลองเพื่อให้ ทราบถึงแนวโน้มของการไหลและการถ่ายเทความร้อนของมวลสารได้ โดยสามารถแสดงให้เห็น ถึงพฤติกรรมของการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน ทำให้เป็นที่นิยมใช้งานอย่างกว้างขวาง ในกลุ่มของวิศวกรและนักวิจัยที่จำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์การไหล เนื่องจากเป็นวิธีที่ สามารถช่วยประหยัดเวลาและงบประมาณในส่วนที่ไม่ต้องสร้างชุดทดลอง โดยในการแก้ปัญหา ของไหลด้วยการจำลองนี้จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตและบริเวณที่จะศึกษาให้ชัดเจน โดยในบทนี้ จะกล่าวถึงสมการพื้นฐานของการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล และโมเดลที่ใช้ในการจำลองการ ไหล รวมไปถึงวิธีการและขั้นตอนการจำลองลักษณะการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.1 ทฤษฎีของการคำนวณพลศาสตร์ของไหล

4.1.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองการไหลทางคณิตศาสตร์

CFD เป็น การแก้ปัญหาของของไหลที่สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิง อนุพันธ์ จากนั้นจะทำการแก้ปัญหามสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดย ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ สำหรับหลักการแก้ปัญหาคด้วย CFD จะใช้วิธีแบบปริมาตร ควบคุม (Control volume) และคิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของของไหลที่พื้นผิวเข้า-ออกของ ปริมาตรควบคุมแต่ละด้าน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของของไหลแต่ละด้านสามารถจัดให้ อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งจะเรียกว่า “สมการควบคุม (Governing equations)” สมการ ควบคุมที่ใช้ในการแก้ปัญหาคการไหลด้วย CFD ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์มวลและสมการเชิง อนุพันธ์โมเมนตัม

สมการเชิงอนุพันธ์มวล

สมการเชิงอนุพันธ์มวล (Conservation of mass) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ที่อธิบายการไม่สูญหายของมวล เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สมการต่อเนื่อง (Continuity equation) โดยที่ตัว แปรเหล่านั้นจะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหลซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

โดยที่ u_i คือ ความเร็ว
 S_m คือ มวลที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายของมวลหลักและแหล่งกำเนิดอื่น

สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

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

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

โดยที่ P คือ ความดันสถิต (Static pressure)
 g_i คือ แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อของไหล (Gravitational body force)
 F_i คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อของไหล (External body force)

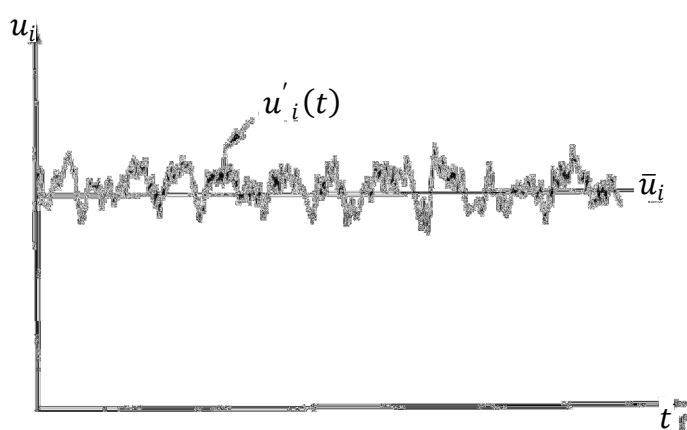
สมการ (4.2) เขียนในรูปแบบอนุพันธ์ (Conservation form) อธิบายได้ว่าผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม (อัตราการไหลเข้าออกสุทธิของโมเมนตัมเชิงเส้น) งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) จึงนำกฎของสโตกส์ (Stokes's law) ซึ่งความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous stresses) เท่ากับผลคูณของความเครียด (Strain rates) และสัมประสิทธิ์ความหนืด (Viscosity coefficient) จะเรียกสมการที่ได้ชื่อว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-stokes equation)

สมการที่กล่าวมาทั้งหมดทั้งสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการที่หาผลเฉลยยากทางคณิตศาสตร์ไม่ว่าจะเขียนระบบสมการย่อยเหล่านี้ในรูปแบบใดก็ตาม เพราะว่าเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Coupled partial differential equations) ผลลัพธ์ที่หาได้ต้องสอดคล้อง (Satisfy) กันทุกสมการพร้อมกัน และความยากอีกส่วนหนึ่งคือ สมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear equations) เป็นการยากที่จะหาผลเฉลยที่เที่ยงตรงถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาจะง่ายก็ตาม จึงทำให้มีวิธีการแก้ปัญหของ

ไหล ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการคำนวณ

4.1.2 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีความเร็วไม่สม่ำเสมอและมีทิศทางเคลื่อนที่ไม่แน่นอน โดยธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วน ความเร็วของของไหลจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลาและตำแหน่งดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วน

การเปลี่ยนแปลงความเร็วสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

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

โดยที่ \bar{u}_i คือ ความเร็วเฉลี่ย (Time average velocity)

u'_i คือ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใด ๆ (Velocity fluctuation)

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

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

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

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

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

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

4.1.3 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model)

ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา การศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นสร้างแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) ขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งแบบจำลองส่วนใหญ่สร้างบนพื้นฐานของ Two-equation model โดยที่แนวคิดแบบนี้ใช้ Boussinesq approximation ร่วมกับสมการ Kinetic energy และ Auxiliary เช่น Dissipation rate (ϵ), Turbulence length scale (l), Specific dissipation rate (ω) เป็นต้น

แบบจำลองความปั่นป่วนมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น $k - \epsilon$ model, $k - \omega$ model, Realizable $k - \epsilon$ model, Algebraic stress model, Reynolds stress model, Shear Stress Transport (SST) model, $v^2 - f$ model และ DNS/LES time-variant model แต่รูปแบบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน Shear Stress Transport (SST) model เนื่องจากเป็นแบบจำลองการไหลปั่นป่วนที่สามารถทำนายการไหลได้ถูกต้องและแม่นยำ และใช้หน่วยความจำและประมวลผลของคอมพิวเตอร์น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ ดังตารางที่

4.1 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ส่วนแบบจำลอง $v^2 - f$ model และ DNS/LES time-variant model เป็นแบบจำลองที่ให้ความถูกต้องและความแม่นยำสูงที่สุด ใช้เวลาในการคำนวณที่นาน สำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน Shear Stress Transport (SST) ถูกพัฒนามาจากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ model และ $k - \omega$ model ให้ความแม่นยำในการจำลองการไหลของเจ็ทได้แม่นยำพอสมควร มีความผิดพลาดในการคำนวณตรงจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point, Nu_0) ประมาณ 20-40%

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k - \epsilon$ model [5]

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

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

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

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

โดยที่ μ_t คือ ความหนืดแบบปั่นป่วน (Eddy viscosity)

k คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy)

ϵ คือ อัตราการสลายแบบปั่นป่วน (Dissipation rate)

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลปั่นป่วน (Turbulent model) ที่ใช้ในการ
แก้ปัญหาเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว [4]

Turbulence model	Computational cost (time required)	Impinging jet transfer coefficient prediction	Ability to predict secondary peak
$k-\epsilon$	★★★★ Low cost	★ Poor: Nu errors of 15–60%	★ Poor
$k-\omega$	★★★★ Low–moderate	★★ Poor–fair: anticipate Nu errors of at least 10–30%	★★ Fair: may have incorrect location or magnitude
Realizable $k-\epsilon$ and other $k-\epsilon$ variations	★★★★ Low	★★ Poor–fair: expect Nu errors of at 15–30%	★★ Poor–fair: may have incorrect location or magnitude
Algebraic stress model	★★★★ Low	★★ Poor–fair: anticipate Nu errors of at least 10–30%	★ Poor
Reynolds stress model (full SMC)	★★ Moderate–high	★ Poor: anticipate Nu errors of 25–100%	★★ Fair: may have incorrect location or magnitude
Shear stress transport (SST), hybrid method	★★★ Low–moderate	★★★ Good: typical Nu_0 errors of 20–40%	★★ Fair
v^2f	★★★ Moderate	★★★★ Excellent: anticipate Nu errors of 2–30%	★★★★ Excellent
DNS/LES time-variant models	★ Extremely high (DNS available for low Re only)	★★★★ Good–excellent	★★★★ Good–excellent

[★ indicating undesirable model characteristics, to ★★★★★ indicating excellent model characteristics.]

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

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

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

โดยที่ G_k คือ อัตราการเกิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

G_b คือ อัตราการเกิดความปั่นป่วนที่เกิดจากการจำลอง

Y_M คือ ผลการขยายความผันผวนของอัตราการสลายปั่นป่วน

σ_k คือ ความปั่นป่วนของแพลนท์นัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน

σ_ϵ คือ ความปั่นป่วนของแพลนท์นัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายปั่นป่วน

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

แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ model [5]

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

สมการ Turbulent kinetic energy ที่ใช้ในแบบจำลอง $k - \omega$ หาได้โดยอาศัยสมการ Turbulent kinetic energy ที่ใช้ในแบบจำลอง Standard $k - \epsilon$ ร่วมกับความสัมพันธ์

$\varepsilon = \beta \omega k$ (เมื่อ β คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ $3/40$ ทำให้ได้สมการ Turbulent kinetic energy คือ

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.11)$$

สมการ Specific dissipation rate, ω คือ อัตราการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยปริมาตรและต่อเวลา ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\omega \approx k^2 / \ell \quad (4.12)$$

สมการ Turbulence length scale, ℓ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\ell = \frac{C_\mu k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (4.13)$$

นิยามสมการ ω โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ω และ k ดังนี้

$$\omega \equiv \frac{\varepsilon}{k} \quad (4.14)$$

ดังนั้นสมการของ ω ซึ่งพัฒนาโดย Bredberg et al. [18] หาได้จากสมการ

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (4.15)$$

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น บริเวณใกล้ผนังจะมีผลของความหนืดและ Turbulence ซึ่งเป็นอิทธิพลที่สำคัญต่อการไหล โดยที่ค่าความเร็วจะขึ้นอยู่กับ Boundary layer ซึ่งในที่นี้การคำนวณค่าความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังจะวิธี Wall function

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

$$\alpha = \frac{\beta^*}{\beta} - \frac{K^2}{\sigma_\omega \sqrt{\alpha^* \beta^*}} \quad (4.16)$$

ค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ ได้ดังนี้

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

แบบจำลอง SST (Shear Stress Transport Turbulence Model) [5]

แบบจำลอง Shear Stress Transport (SST) พัฒนาโดย Menter (1993, 1994) ได้รวมเอาสิ่งที่พึงประสงค์ของแบบจำลองแบบ 2 สมการเข้าด้วยกัน โดยมีสองสิ่งหลักคือการทำน้ำหนัก (Weighting) ของค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองในแต่ละส่วนของการจำลองไม่เท่ากัน และมีการกำหนดขีดจำกัดของการเกิดของ Eddy viscosity ของการไหลแบบ Strained flow ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แบบจำลองแบบแบ่งส่วนจะใช้ แบบจำลอง $k-\omega$ ที่บริเวณใกล้ผนัง และ ใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่บริเวณไกลออกไปจากผนัง การสลับเปลี่ยนแบบจำลองสามารถทำได้โดยใช้ Blending function ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของแบบจำลอง นอกจากนี้แบบจำลองแบบ SST ได้ทำการปรับปรุงค่า Eddy viscosity โดยการบังคับค่า Turbulent shear stress ให้มีขอบเขต การปรับปรุงนี้ทำให้การทำนายการไหลที่มี Adverse pressure gradient อย่างรุนแรงได้ดีขึ้น

การผสมผสานระหว่างแบบจำลอง $k-\omega$ กับ $k-\varepsilon$ มีความแตกต่างจากแบบจำลอง $k-\omega$ ดั้งเดิมคือการเพิ่มเทอม Cross-diffusion เข้าไปในสมการ ω และค่าคงที่ของแบบจำลองที่ต่างกัน แบบจำลอง $k-\omega$ ดั้งเดิมจะถูกคูณด้วยฟังก์ชัน F_1 และทำการปรับเปลี่ยนไปยังแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ด้วยฟังก์ชัน $1-F_1$ สมการที่เกี่ยวข้องกันแต่ละแบบจำลองจะถูกรวมเข้าด้วยกันค่าฟังก์ชัน F_1 ถูกออกแบบให้มีค่าเป็น 1 ที่บริเวณใกล้ผนังและเป็น 0 เมื่อห่างออกไปจากผนังโดยทั่วไปแบบจำลองแบบ 2 สมการจะทำนายการไหลแบบแยกตัวได้ดีกว่าความเป็นจริง กล่าวคือจุดการเกิดการไหลแยกเกิดช้ากว่าความเป็นจริง ซึ่งเป็นข้อด้อยที่รุนแรงสำหรับงานทางด้านอากาศยานศาสตร์ เนื่องจากแบบจำลองแบบ 2 สมการไม่ได้มีกลไกของการส่งผ่าน Turbulent shear stress ดังนั้นการปรับปรุงทำได้โดยการใช้วิธีการทางพีชคณิตด้วยการจำลองการส่งผ่าน Turbulent shear stress ดังกล่าวให้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานจลน์ของความ

ปั่นป่วน ดังนั้นในแบบจำลอง SST ได้มีการปรับปรุงค่าฟังก์ชันการคำนวณค่า Eddy viscosity เพื่อปรับปรุงการทำนายการไหลแบบแยกตัวด้วย Blending function F_2 ดังนี้

$$F_2 = \tanh \left\{ \left(\max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \right)^2 \right\} \quad (4.17)$$

$$\mu_t = \min \left[\frac{\rho k}{\omega}; \frac{a_1 \rho k}{SF_2} \right] \quad (4.18)$$

เมื่อ $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ คือ Strainrate และ $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ สมการ Transport ของ SST เป็นดังนี้

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = P_k - D_k \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = \alpha \rho \frac{\varepsilon}{k} D_\omega - 2(1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (4.20)$$

$$P_k = \min [\mu_t S^2; 10 \rho \beta^* k \omega] \quad (4.21)$$

$$D_k = \rho \beta^* k \omega \quad (4.22)$$

$$D_\omega = \beta \rho \omega^2 \quad (4.23)$$

ค่าฟังก์ชัน F_1 ถูกออกแบบเพื่อผสมค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของ $k - \omega$ ดั้งเดิมในส่วนที่เป็นชั้นขีดผิวกับแบบจำลอง $k - \varepsilon$ (ที่ได้รับการปรับเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ $k - \omega$) ในส่วนที่เป็น Free-shear layer และส่วน Free-stream ฟังก์ชันนี้มีค่าเป็น 1 ที่ผิว มีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อ ถัดออกมาในส่วนที่เป็นชั้นขีดผิวและมีค่าเข้าสู่ 0 ที่ขอบของชั้นขีดผิว ค่าฟังก์ชันการผสม F_1 นิยาม ดังนี้

$$F_1 = \tanh \left\{ \left(\min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}; \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right\} \quad (4.24)$$

ซึ่งค่า $CD_{k\omega}$ คือ Cross-diffusion ในสมการ $k-\omega$ หาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$CD_{k\omega} = \max \left[\frac{2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}; \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right] \quad (4.25)$$

สำหรับค่าคงที่ของแบบจำลอง SST คือ $\alpha_1 = 0.31, K = 0.41, \beta^* = 9/100$

สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง β, γ, σ_k และ σ_ω แสดงให้อยู่ในรูปของตัวแปรทั่วไป ϕ และถูกกำหนดโดยการผสมของตัวแปรของแบบจำลอง $k-\omega$ ดั้งเดิม (ϕ_1) กับแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ที่ได้ปรับเปลี่ยนแล้ว (ϕ_2)

$$\phi = F_1\phi_1 + (1-F_1)\phi_2 \quad (4.26)$$

$$\text{เมื่อ } \phi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta, \alpha\}$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองดั้งเดิมกำหนดเป็นดังนี้

-สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านใน

$$\sigma_{k1} = 0.85 \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5 \quad \beta_1 = 0.075 \quad \alpha_1 = 0.553$$

-สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านนอก

$$\sigma_{k2} = 1.0 \quad \sigma_{\omega 2} = 0.856 \quad \beta_2 = 0.0828 \quad \alpha_2 = 0.440$$

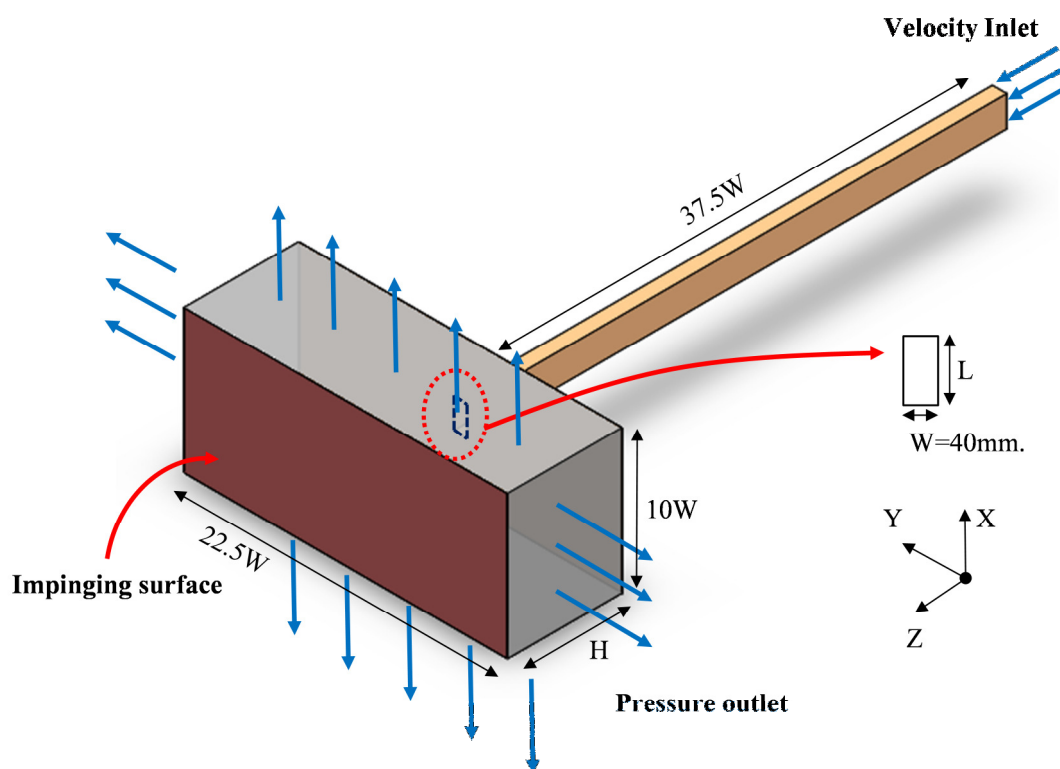
จากแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสามแบบที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสามแบบ

แบบจำลองความปั่นป่วน	ข้อดี	ข้อเสีย
$k - \epsilon$ model	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อย 2. ใช้หน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์น้อย 3. มีการคำนวณที่แม่นยำบริเวณไกลออกไปจากผนังที่เจ็ทพุ่งชน 	1. มีความแม่นยำในการจำลองการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวต่ำ
$k - \omega$ model	<ol style="list-style-type: none"> 1. ใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อย 2. ใช้หน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์น้อย 3. มีการคำนวณที่แม่นยำบริเวณใกล้ผนังที่เจ็ทพุ่งชน 	1. มีความแม่นยำในการจำลองการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวต่ำ
SST (Shear Stress Transport)	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีความแม่นยำในการจำลองการไหลของเจ็ทอยู่ในเกณฑ์ดี 2. มีการคำนวณที่แม่นยำในบริเวณใกล้ผนังและบริเวณที่ไกลออกไปจากผนังที่เจ็ทพุ่งชน 	1. ใช้ระยะเวลาในการคำนวณและหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์มากกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลอง $k - \epsilon$ และ $k - \omega$

4.2 โมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชน

การจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Ver.13 (Fluent) ในการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยเป็นการจำลองการไหลแบบ 3 มิติซึ่งมีขนาดเท่ากับการทดลองจริง ในส่วนของแบบจำลองนี้จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนของบริเวณท่อเจ็ทอากาศมีขนาดความกว้าง (W) 40 mm ในด้านขนาดความยาว (L) จะมีขนาดของแต่ละแบบจำลองที่ต่างกันเพื่อให้พื้นที่บริเวณปากทางออกเท่ากัน ในส่วนที่สองเป็นบริเวณพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีขนาดกว้าง × ยาว เท่ากับ $10W \times 22.5W$ ในส่วนสุดท้ายเป็นบริเวณระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงบริเวณพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เท่ากับ $2W$, $4W$, $6W$ และ $8W$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.2



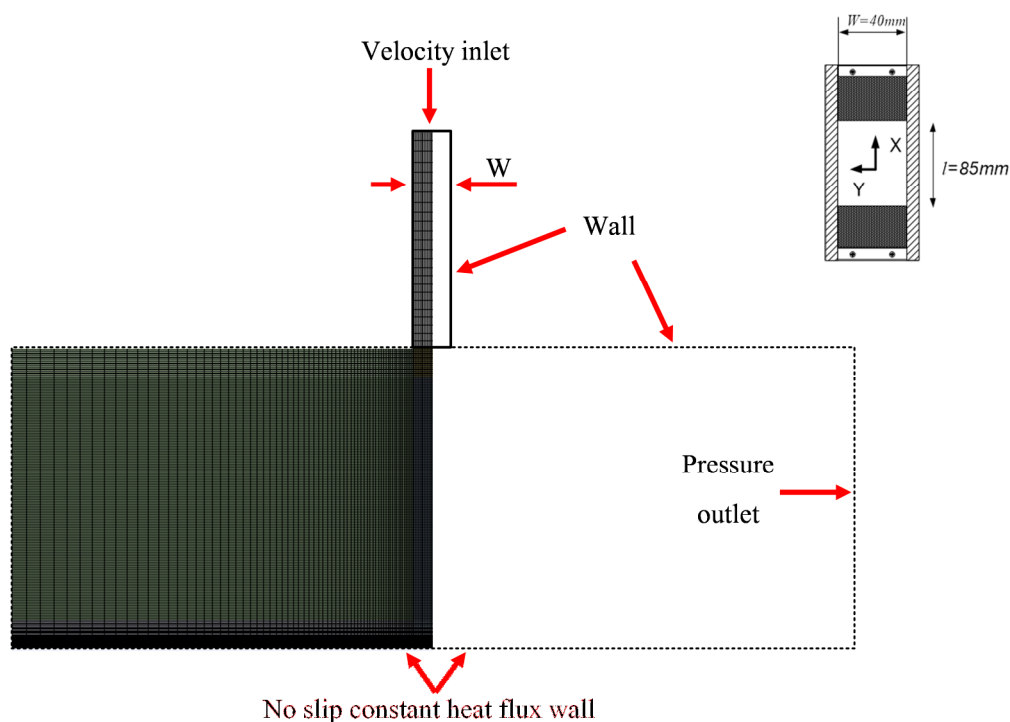
รูปที่ 4.2 แสดงโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

4.3 ขั้นตอนการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

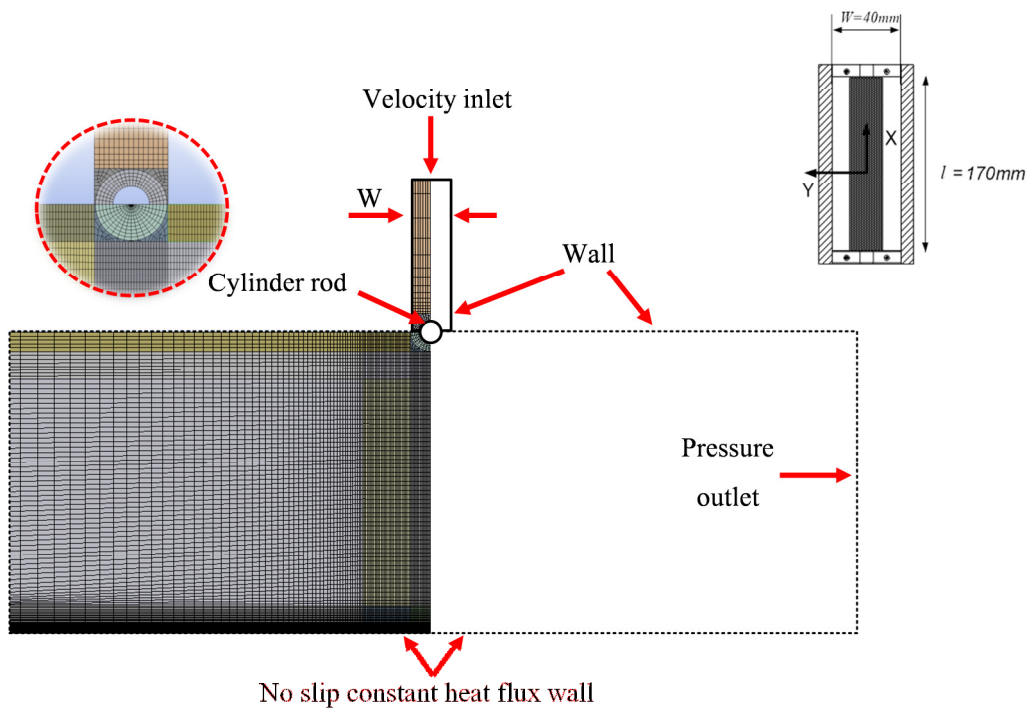
สำหรับวิธีการและขั้นตอนการการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนเริ่มจากการสร้างแบบจำลองโมเดลของของไหลมีขนาดเท่ากับชุดทดลองจริง และขั้นตอนการสร้างกริด (Meshing) และกำหนดขอบเขตเงื่อนไขขอบเขตของโมเดลที่จำลองการไหล

4.3.1 การสร้างกริด (Meshing)

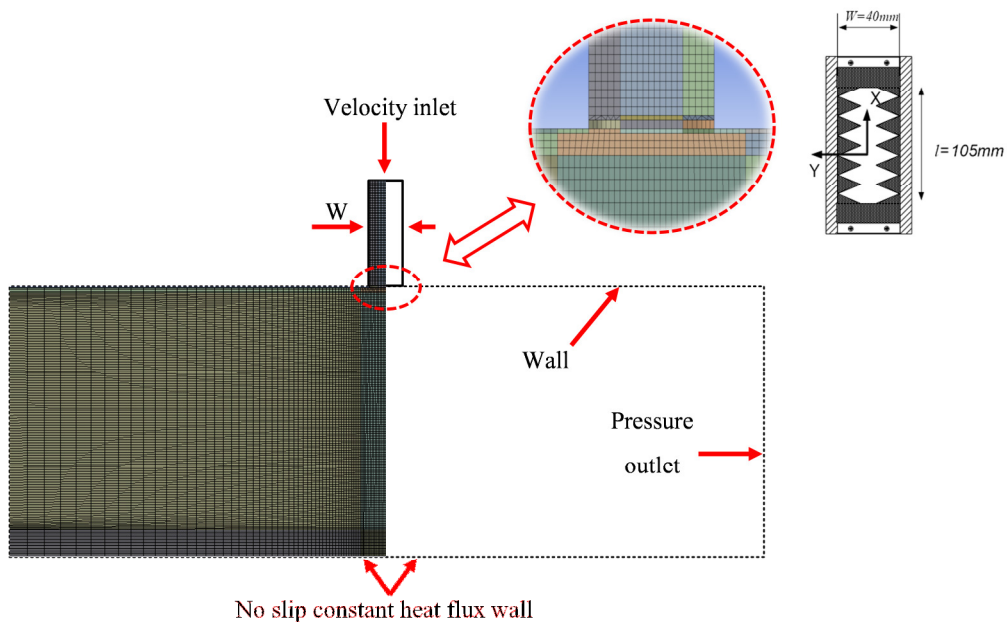
การสร้างกริด (Meshing) เป็นขั้นตอนต่อจากการสร้างโมเดล ซึ่งในรูปที่ 4.3 และ 4.4 เป็นการแสดงรายละเอียดของกริดที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งกริดที่ใช้ในการคำนวณจะมีลักษณะลูกบาศก์สี่เหลี่ยม โดยลักษณะกริดของแบบจำลองแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออกปรกติดังแสดงในรูปที่ 4.3 กรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 4.4 และกรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งบริเวณตรงกลางที่ตำแหน่งปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าของความละเอียดของกริดที่สูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่ต้องการความละเอียดในการคำนวณ โดยค่าความละเอียดของกริดจะมีค่าที่ลดลงเมื่อมีระยะห่างจากตำแหน่งของลำเจ็ทและพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในส่วนของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนเป็นบริเวณที่ต้องการความแม่นยำที่สูงเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วของลำเจ็ทอย่างกะทันหัน ได้มีการกำหนดค่าของ y^+ ที่บริเวณนี้ให้มีค่าน้อยกว่า 5 เพื่อให้ค่าความแม่นยำตรงบริเวณสูง



รูปที่ 4.3 แสดงรายละเอียดกริดของแบบจำลองกรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออกปรกติ



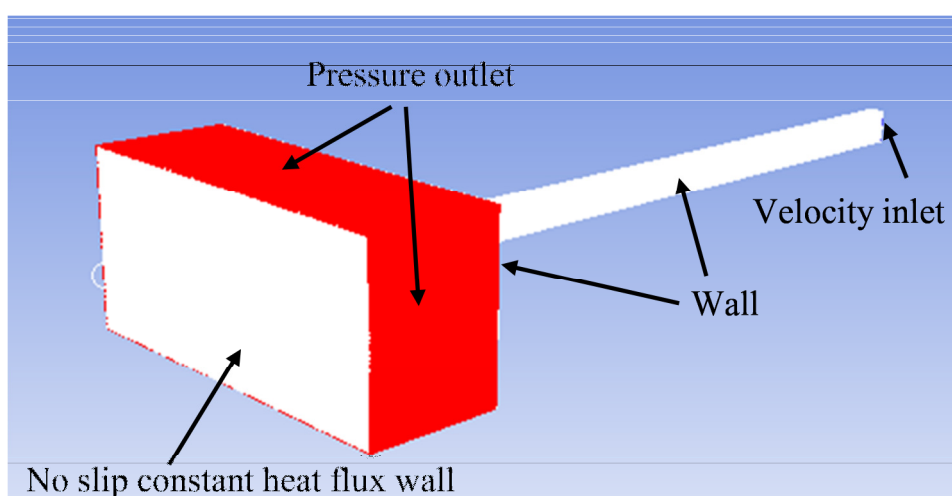
รูปที่ 4.4 แสดงรายละเอียดกริดของแบบจำลองกรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออก
ติดตั้งแท่งทรงกระบอก



รูปที่ 4.5 แสดงรายละเอียดกริดของแบบจำลองกรณีเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออก
ติดตั้งซี่ฟันเลื่อย

4.3.2 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ (Boundary condition)

ในการจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นนั้น ได้กำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองมีค่าคงที่ ในส่วนของการวิเคราะห์การไหลเป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady flow) ไม่พิจารณาผลที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดการสูญเสียความร้อน ไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วง โดยใช้โมเดลแบบจำลองของความปั่นป่วนแบบ Shear Stress Transport (SST) model ซึ่งในส่วนขอบเขตที่ใกล้พื้นผิวได้กำหนดให้ใช้แบบ Non-equilibrium wall functions



รูปที่ 4.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล

มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหลของเจ็ทพุ่งชนซึ่งแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ บริเวณที่ 1 Velocity inlet คือ บริเวณพื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางเข้าของการไหล โดยกำหนดให้ลักษณะของทางเข้าอยู่ในรูปแบบของความเร็วของการไหล บริเวณที่ 2 Wall (สีขาว) คือ บริเวณพื้นผิวที่กำหนดให้เป็นผนังของการไหล โดยพื้นที่ที่กำหนดให้เป็นผนังนี้จะอยู่ในส่วนของผนังของท่อเจ็ทแบบสี่เหลี่ยม บริเวณผนังที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ทและบริเวณพื้นที่ผิวที่เจ็ทพุ่งชน ส่วนบริเวณที่ 3 Pressure outlet (สีแดง) คือ บริเวณพื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางออกของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางออกในรูปแบบของความดันที่ทางออกของการไหล

การกำหนดเงื่อนไขของผนังของการไหล ความดันทางออก และความเร็วได้กำหนดดังนี้

เงื่อนไขของผนังของการไหล

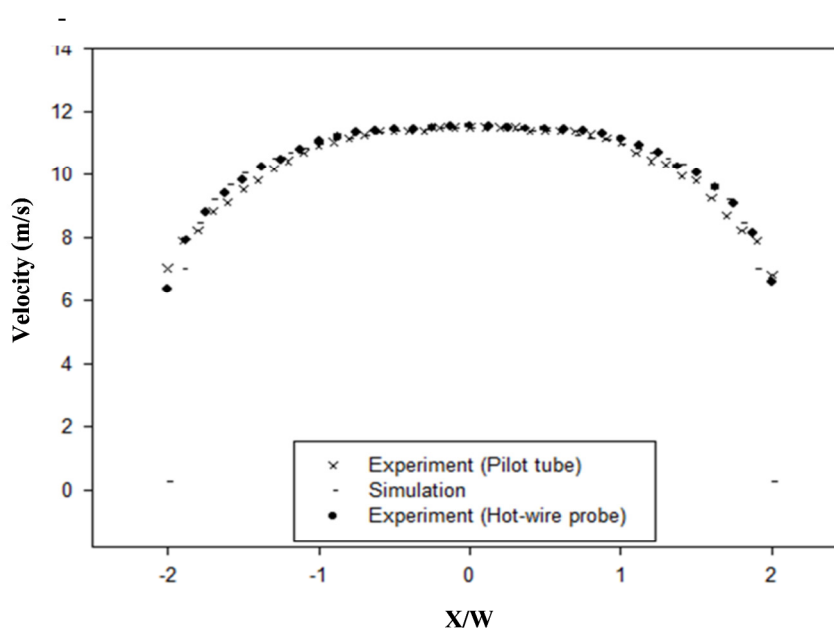
- ผนังไม่มีการไถล
- ผนังไม่มีการเคลื่อนที่
- ค่าฟลักซ์ความร้อนบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนคงที่เท่ากับการทดลอง

เงื่อนไขของความดันทางออก

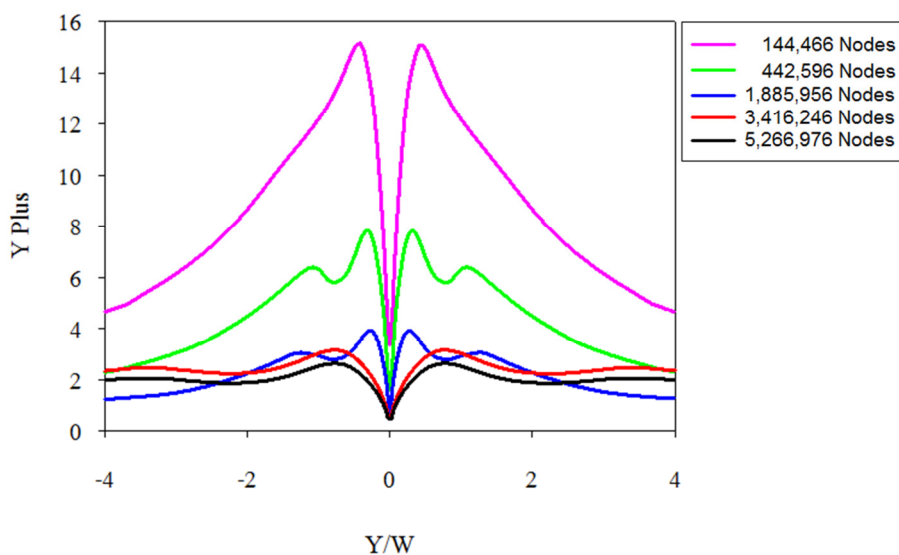
- ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจมีค่าเท่ากับ 0 Pa)

เงื่อนไขของความเร็วทางเข้า

- กำหนดความเร็วของไหลที่ทางเข้าให้มีค่าคงที่เท่ากับการทดลองที่ค่า $Re=15,000$ ซึ่งเท่ากับความเร็วที่ใช้ในการทดลองจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วของเจ็ทอิสระที่ตำแหน่งปากทางออกระหว่างการทดลอง และการจำลองการไหลทางพลศาสตร์ของของไหล



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่า Y Plus ที่ความละเอียดของกริดแตกต่างกัน

4.3.3 การคำนวณ

ในส่วนของวิธีการคำนวณ ได้กำหนดอัลกอริทึมที่ใช้คำนวณเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยมีรายละเอียดของ Spatial discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ในการคำนวณกำหนดตามตารางที่ 4.3 ซึ่งกำหนดเงื่อนไขในการหยุดของการประมวลผลเมื่อมีค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ 1×10^{-4}

ตารางที่ 4.3 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization [23]

Gradient	Least squares cell based
Pressure	Second order
Momentum	Second order upwind
Turbulent kinetic energy (k)	Second order upwind
Specific dissipation rate (ω)	Second order upwind

บทที่ 5

ผลการศึกษา

ในส่วนของบทนี้ได้อธิบายถึงรายละเอียดผลการทดลองซึ่งแยกออกเป็น 4 ส่วน ในส่วนแรกการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระ ซึ่งในรายละเอียดได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของการกระจายความเร็วและการกระจายความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยในรายละเอียดได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ของการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน การเปรียบเทียบนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในแต่ละกรณี ส่วนที่สามศึกษาผลจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว (CFD) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการถ่ายเทความร้อนและส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนโดยใช้เจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศน

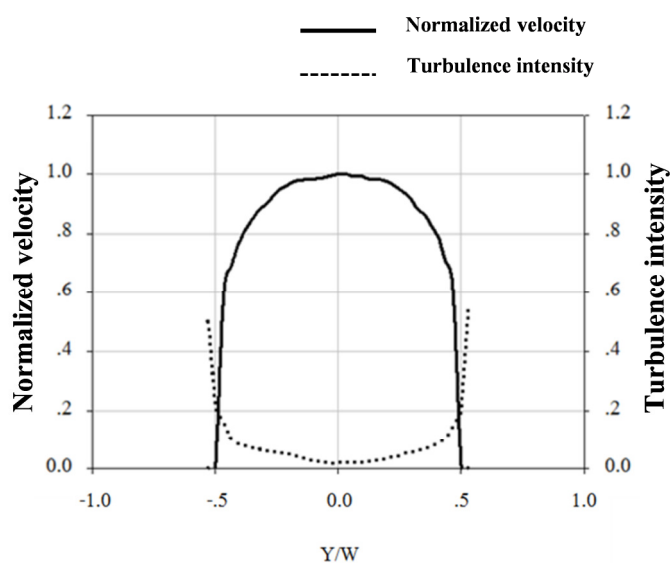
5.1 การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระ

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงลักษณะการกระจายตัวของความเร็ว ลักษณะการกระจายความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ เพื่ออธิบายถึงลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ท กรณีเจ็ทท่อปรกติ (Conventional slot nozzle) กรณีท่อแบบติดตั้งแท่งกั้นทรงกระบอกที่ปากทางออก (Rod installation) และกรณีท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออก (Tab installation) ที่เงื่อนไขต่างๆ แล้วนำผลการศึกษาในกรณีเจ็ทอิสระไปอธิบายผลเพื่ออ้างอิงผลของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้

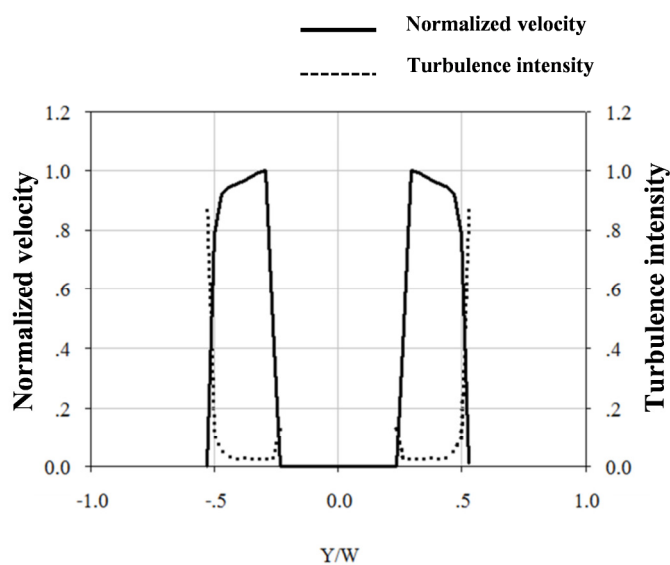
5.1.1 การศึกษาลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระ

การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Y บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของปากทางออกเจ็ทในแนวแกน X ซึ่งทดลองในกรณีปรับแต่งบริเวณปากทางออก 3 แบบ คือ ปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอก ปากทางออกติดตั้งซี่ฟันปลา และปากทางออกแบบปรกติ โดยในทุกกรณีมีความกว้างของปากทางออก (W) เท่ากับ 40 mm และมีพื้นที่บริเวณปากทางออกที่เท่ากัน ที่ระยะห่างจากปากทางออกที่ระยะต่างๆ (แนวแกน Z) จากผลของการศึกษาพบว่าลักษณะการกระจายตัวของความเร็วเจ็ทบริเวณปากทางออกที่มีระยะห่าง 1mm ($Z/W=0$) จะมีลักษณะการกระจายตัวของความเร็วเป็น 3 กรณีดังนี้

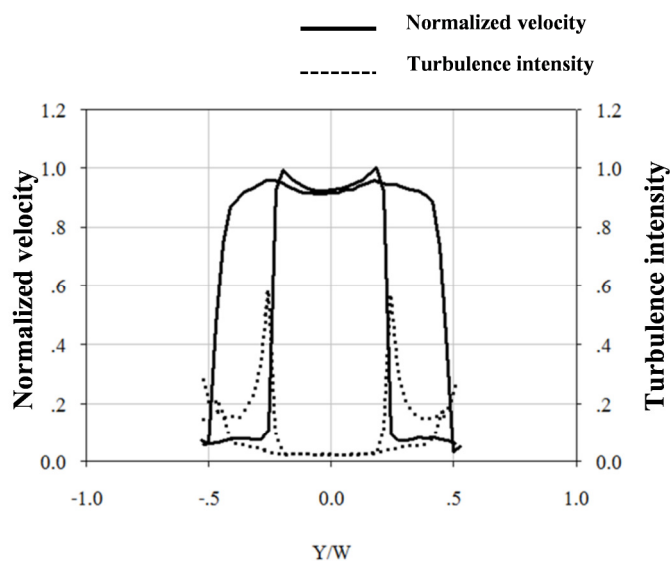
กรณีท่อแบบปากทางออกปรกติ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ค่าความเร็วตรงบริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท ($Y/W=0$) จะมีค่าความเร็วสูงที่สุดและค่าความเร็วจะค่อยๆลดลงตามแนวความกว้างของปากทางออกเจ็ท โดยค่าความเร็วมีค่าสูงสุดที่ทุกระยะห่างจากปากทางออกจะอยู่บริเวณนี้ โดยในส่วนของค่าความปั่นป่วนจะมีค่าที่ต่ำบริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่บริเวณรอบข้างของลำเจ็ทเนื่องจากเกิดการผสมตัวกันของของไหลบริเวณรอบกับลำเจ็ท



รูปที่ 5.1 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระกรณีท่อแบบปรกติ
($Re=15,000$, $V_0=11.7\text{m/s}$, $Z/W=0$)



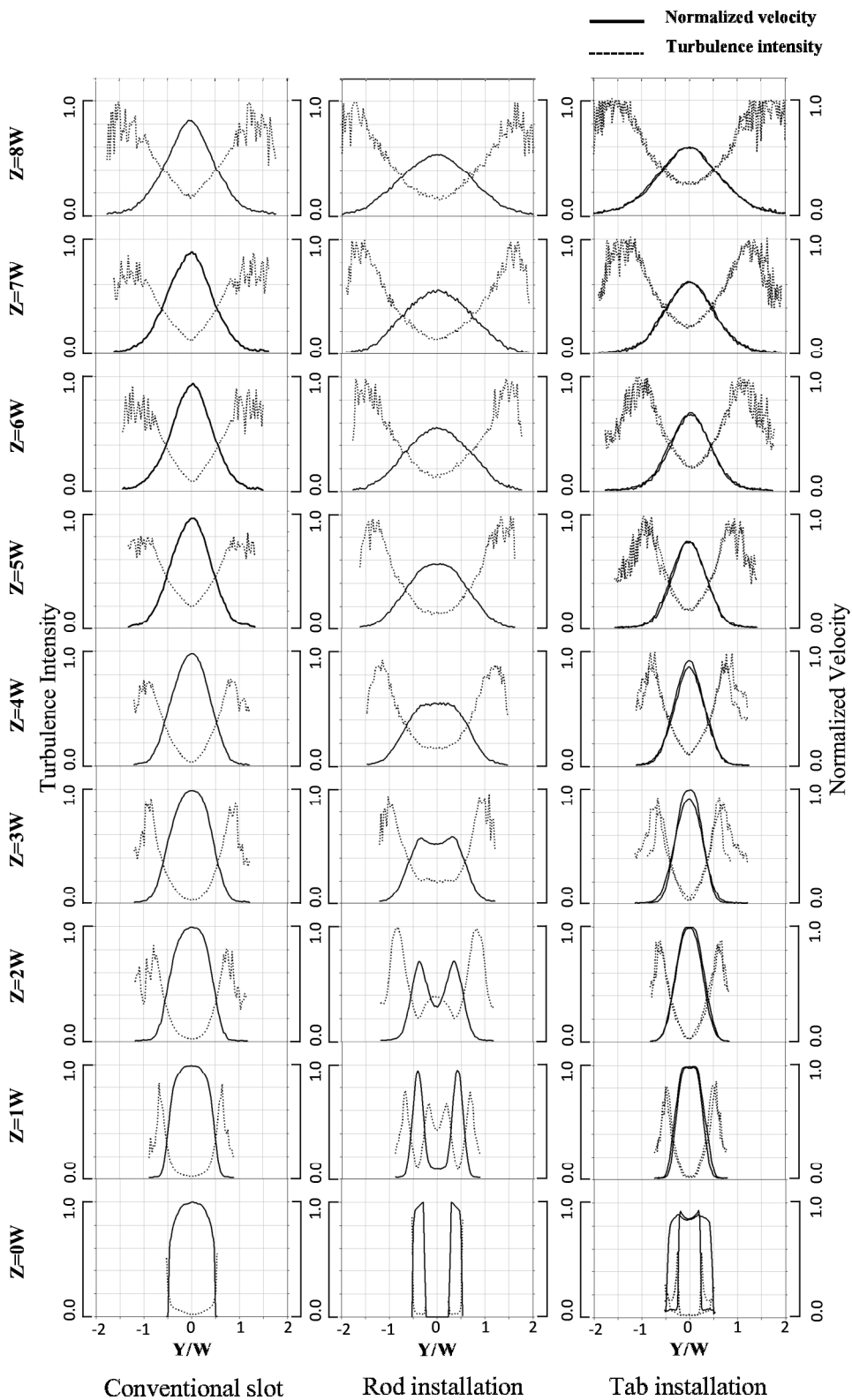
รูปที่ 5.2 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระกรณีท่อแบบติดตั้ง
แท่งทรงกระบอกที่ปากทางออก ($Re=15,000$, $V_0=13.6\text{m/s}$, $Z/W=0$)



รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระกรณีท่อแบบติดตั้งชี้พื้นเลื้อยที่ปากทางออก ($Re=15,000$, $V_0=12.9\text{m/s}$, $Z/W=0$)

กรณีท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออก ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ค่าความเร็วสูงสุดที่บริเวณนี้จะมีอยู่ 2 ตำแหน่งซึ่งไม่ใช่บริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท ($Y/W=0$) เป็นผลมาจากเมื่อลำเจ็ทไหลผ่านแท่งทรงกระบอกจะเกิดการแยกตัวของลำเจ็ทออกเป็น 2 ด้าน (เมื่อมองทิศทางแนวระนาบ XY) โดยค่าความเร็วสูงสุดของลำเจ็ทที่ทุกระยะห่างจากปากทางออกจะอยู่บริเวณนี้ ซึ่งจะมีค่าสูงสุดบริเวณด้านที่ไหลผ่านแท่งทรงกระบอก โดยค่าความปั่นป่วนบริเวณขอบของลำเจ็ทบริเวณนี้จะมีค่าที่สูงที่สุดในทุกกรณีของปากทางออก

กรณีท่อแบบติดตั้งชี้พื้นเลื้อยที่ปากทางออก เมื่อลำเจ็ทไหลผ่านชี้พื้นเลื้อย (Orifice) จะเกิดปรากฏการณ์ Vena contracta โดยเมื่อของไหลไหลผ่านชี้พื้นเลื้อยจะมีทั้งบริเวณที่ของไหลสามารถไหลผ่านไปได้ และบริเวณที่ของไหลไม่สามารถไหลผ่านไปได้ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางของลำเจ็ทที่ชนชี้พื้นเลื้อย เมื่อของไหลไหลผ่านหน้าตัดที่มีการลดพื้นที่หน้าตัดอย่างทันทีทันใด ทำให้เกิดความปั่นป่วนของลำเจ็ทสูงขึ้นในบริเวณนี้ ส่งผลให้ค่าของความเร็วบริเวณนี้มีค่าที่ลดลง ซึ่งค่าความเร็วสูงสุดของลำเจ็ทกรณีปากทางออกติดตั้งชี้พื้นเลื้อยไม่ได้อยู่บริเวณนี้ โดยในกรณีนี้จะทดลองที่ 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งของค่าความเร็วและความปั่นป่วนที่ผ่านจุดยอดของชี้พื้นเลื้อย และตำแหน่งที่ผ่านจุดฐานของชี้พื้นเลื้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งในทั้ง 2 บริเวณค่าความปั่นป่วนมีค่าสูงสุดบริเวณขอบของลำเจ็ทเช่นกัน



รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ (Re=15,000)

ลักษณะความเร็วของลำเจ็ทที่ระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W > 2$) สามารถแบ่งลักษณะความเร็วและความปั่นป่วนออกเป็น 2 กรณี โดยในกรณีแรกลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนเจ็ทอิสระของปากทางออกแบบท่อปรกติและท่อติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกจะมีความคล้ายคลึงกันคือ ค่าความเร็วสูงสุดจะอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท ($Y/W = 0$) ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท (Z/W) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าความเร็วของลำเจ็ทจะมีค่าที่เริ่มลดลงในขณะเดียวกันจะมีการกระจายของความเร็วตามแนวความกว้างของปากทางออกเจ็ทที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากปากทางออก และพบว่าในท่อแบบปากทางออกปรกติมีการลดลงของค่าความเร็วที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับท่อแบบปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อย แต่ในส่วนของการกระจายความเร็วในแนวความกว้างของปากทางออกเจ็ทพบว่าท่อแบบปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยนั้นจะมีการกระจายตัวของความเร็วที่มากกว่าท่อแบบปากทางออกปรกติ

ในกรณีที่สอง คือกรณีท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่บริเวณปากทางออก จากการศึกษาค้นคว้าค่าความเร็วสูงสุดของลำเจ็ทจะมีอยู่ 2 ตำแหน่งที่ระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W = 2$) และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น พบว่าค่าความเร็วสูงสุดมีค่าที่ลดลงและเกิดการรวมตัวกันของลำเจ็ททั้ง 2 ตำแหน่ง ทำให้ที่ระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W = 4$) เป็นต้นไปค่าความเร็วสูงสุดของลำเจ็ทอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ทแทน โดยค่าความเร็วสูงสุดจะมีค่าที่ต่ำลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับท่อแบบปากทางออกปรกติ และท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออก แต่จะมีการกระจายความเร็วในแนวความกว้างของปากทางออกเจ็ทแทน เมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีค่าเพิ่มขึ้น

จากผลการกระจายของความปั่นป่วนของเจ็ทอิสระตามแนวแกน Y พบว่าค่าความปั่นป่วนบริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ทจะมีค่าที่ต่ำที่สุดในทุกกรณีเนื่องมาจากมีค่าโมเมนตัมพุงชนที่สูง โดยจะมีค่าความปั่นป่วนที่เพิ่มขึ้นตามแนวความกว้างของปากทางออกเจ็ท ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดการผสมกันระหว่างของไหลที่อยู่บริเวณรอบกับลำเจ็ททำให้โมเมนตัมพุงชนลดลง โดยที่ระยะห่างจากปากทางออกมีค่าน้อยการผสมกันของของไหลรอบๆกับลำเจ็ทจะมีค่าน้อย และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น การผสมกันของของไหลรอบๆกับลำเจ็ทยังคงมีการผสมกันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ค่าความปั่นป่วนของลำเจ็ทบริเวณใกล้กับของไหลโดยรอบลำเจ็ทมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นและมีการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้นตามแนวความกว้างของปากทางออกเจ็ท และค่าความปั่นป่วนบริเวณจุดศูนย์กลางมีค่าความปั่นป่วนที่สูงขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากโมเมนตัมพุงชนมีค่าลดลง

โดยภาพรวมค่าความปั่นป่วนของลำเจ็ทที่ระยะห่างจากปากทางออกมีค่าน้อย $Z/W = 1$ และ $Z/W = 2$ ในกรณีท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกผลของความปั่นป่วน

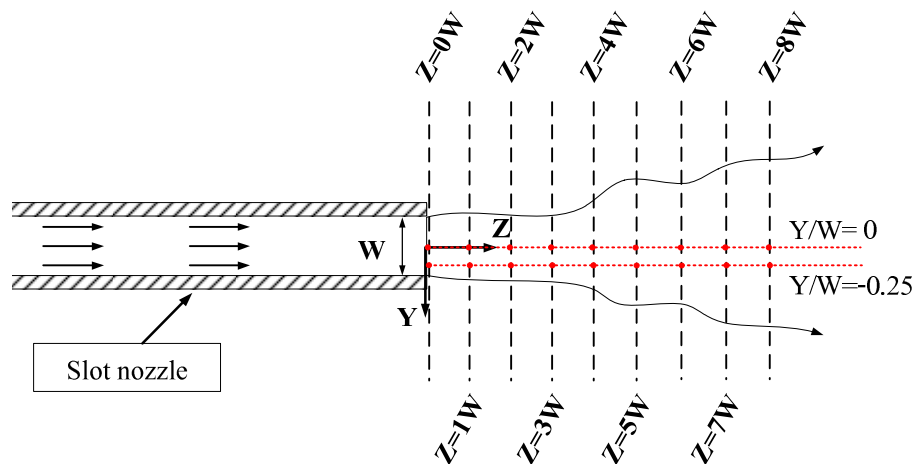
ของลำเจ็ทมีค่าสูงสุดเนื่องมาจากค่าความเร็วสูงสุดของลำเจ็ทมี 2 ตำแหน่งเกิดปรากฏการณ์ von Karman vortex ที่บริเวณด้านหลังแท่งทรงกระบอก ทำให้เกิดความปั่นป่วนที่บริเวณใกล้เคียงของไหลรอบข้างมากกว่าแบบท่อปากทางออกปรกติและท่อแบบติดตั้งซี่ฟันปลาที่ปากทางออกที่ระยะห่างจากปากทางออกเดียวกัน

เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้น ($Z/W > 3$) เป็นต้นไป ท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกจะมีความปั่นป่วนที่เพิ่มสูงขึ้น มากกว่าท่อแบบปากทางออกปรกติและท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออก เนื่องมาจากค่าความปั่นป่วนนั้นเกิดขึ้นมาจากทั้งสองด้านคือความปั่นป่วนของลำเจ็ทที่ไหลผ่านซี่ฟันเลื่อยเกิดปรากฏการณ์ Vena contracta ทำให้บริเวณโดยรอบของลำเจ็ทมีความปั่นป่วนที่สูงอยู่แล้ว และการผสมกันของของไหลโดยรอบกับลำเจ็ท ทำให้ความปั่นป่วนของลำเจ็ทมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีก โดยที่ระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W > 3$) ค่าความปั่นป่วนของลำเจ็ทท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยจะมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปากทางออกแบบอื่นๆ

โดยในส่วนของปากทางออกแบบปรกติจะเห็นได้ว่า ที่ระยะห่างจากปากทางออกมีค่าต่ำ ค่าของความปั่นป่วนมีค่าที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยและติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออก และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าความปั่นป่วนของเจ็ทท่อแบบปรกติมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยและจะมีค่าสูงสุดที่ระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W = 8$)

5.1.2 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอากาศอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z)

ด้านลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอากาศอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) เนื่องด้วยกรณีปากทางออกแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกนั้นบริเวณจุดศูนย์กลางปากทางออกของท่อเจ็ทในแนวแกน Y มีการติดตั้งแท่งกั้นทรงกระบอกขวางอยู่ ทำให้ต้องมีผลการศึกษาอยู่ 2 ตำแหน่งคือ บริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W = 0$) และจุดศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทที่ติดตั้งแท่งทรงกระบอก ($Y/W = -0.25$) เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของผลของความเร็วและความปั่นป่วนในแนวแกน Z ของแต่ละปากทางออกดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วและความดันของลำเจ็ทอากาศอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท

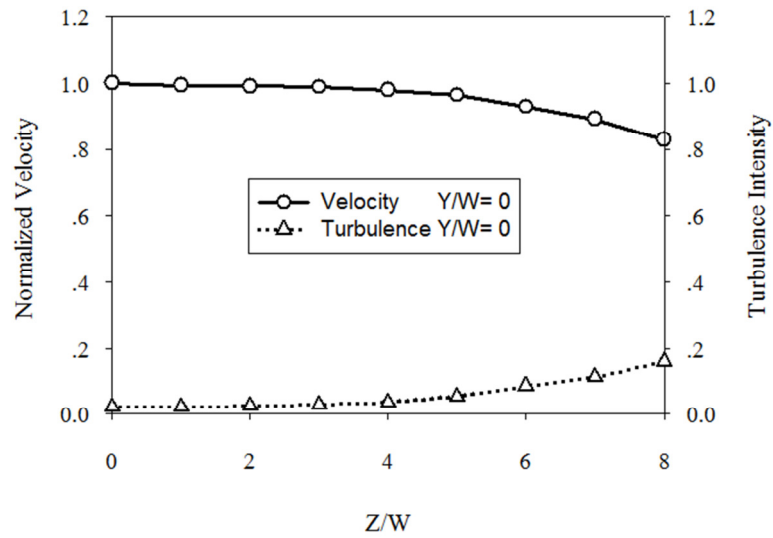
ในกรณีท่อแบบปากทางออกปรกติ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ที่ตำแหน่งบริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W=0$) ผลของค่าความเร็วในทิศทางแนวแกนเจ็ท (Z) จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณห่างจากปากทางออกน้อยที่สุด ($Z/W=0$) และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกนั้นมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าความเร็วของลำเจ็ทในทิศทางตามแนวแกนเจ็ทมีค่าที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนที่บริเวณ ($Y/W=0.25$) ดังรูปที่ 5.7 จากผลของการทดลองพบว่า ค่าความเร็วของเจ็ทในทิศทางตามแนวแกนเจ็ทนั้นมีผลที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับบริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W=0$) คือค่าความเร็วจะค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความเร็วสูงสุดที่บริเวณ ($Y/W=0.25$) มีค่าที่ต่ำกว่าบริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ส่วนลักษณะของความปั่นป่วนของเจ็ทในทิศทางแนวแกน Z นั้นผลของความปั่นป่วนในบริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W=0$) และ ($Y/W=0.25$) มีแนวโน้มที่คล้ายกันคือ ที่ระยะห่างจากปากทางออกน้อยค่าความปั่นป่วนจะมีค่าน้อย และค่าของความปั่นป่วนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในบริเวณจุดศูนย์กลางของปากทางออกท่อเจ็ทที่ติดตั้งแท่งทรงกระบอก ($Y/W=0.25$) มีค่าความปั่นป่วนที่สูงกว่าบริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W=0$)

กรณีปากทางออกแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอก ที่บริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W=0$) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยในตำแหน่งดังกล่าวมีการติดตั้งแท่งทรงกระบอกอยู่ทำให้ค่าความเร็วในแนวแกนเจ็ทที่บริเวณใกล้กับปากทางออกมีค่าที่ต่ำมากเนื่องจากแท่งทรงกระบอกได้ขวางการไหลของเจ็ท และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทมีค่าที่สูงขึ้นค่าความเร็วของเจ็ทเริ่มมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของลำเจ็ทที่ด้านหลังแท่งทรงกระบอกทำให้เกิดการหมุน

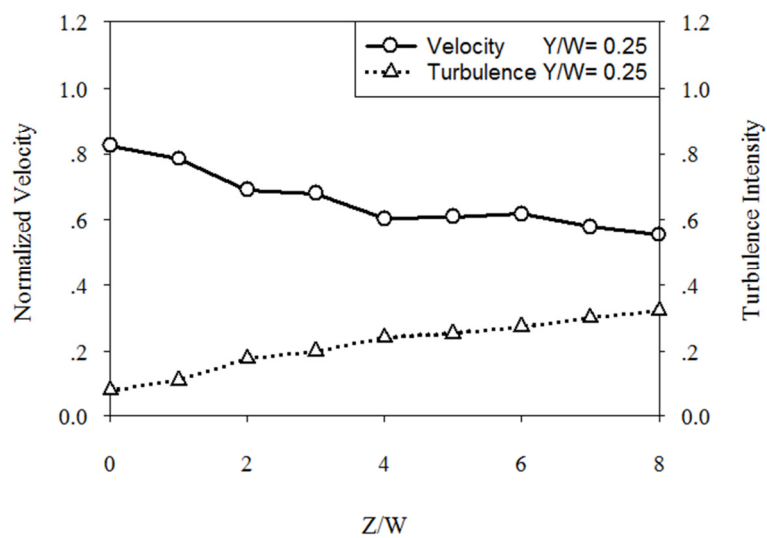
วนด้านหลังแห่งทรงกระบอก ส่งผลให้ค่าความปั่นป่วนบริเวณด้านหลังแห่งทรงกระบอกนั้นมีค่าที่สูง และค่าของความปั่นป่วนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้น ในส่วนของบริเวณปากทางออกท่อเจ็ทที่ติดตั้งแห่งทรงกระบอก ($Y/W=0.25$) ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ผลการทดลองพบว่าค่าความเร็วเจ็ทอิสระจะมีค่าสูงมากที่ระยะห่างจากปากทางออกมีค่าต่ำและเมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความเร็วของเจ็ทจะมีค่าลดลงตามลำดับและค่าความปั่นป่วนที่บริเวณนี้มีค่าน้อยที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้น

กรณีท่อแบบติดตั้งซีพินเดี่ยวที่ปากทางออกที่บริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W=0$) ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ลักษณะความเร็วตามแนวแกนเจ็ท (Z) ในกรณีนี้ได้ทำการทดลองที่ตำแหน่ง 2 จุดคือ ตำแหน่งผ่านจุดยอดของแผ่นซีพินเดี่ยวและตำแหน่งผ่านจุดฐานของแผ่นซีพินปลา จากผลการศึกษาพบว่า ในทั้ง 2 ตำแหน่งนั้นมีค่าของความเร็วและความปั่นป่วนในแนวแกนเจ็ทที่มีแนวโน้มคล้ายกัน บริเวณจุดกลางของท่อเจ็ท ($Y/W=0$) ที่ระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W=0$) ค่าความเร็วจะมีค่าที่ต่ำเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Vena contracta ซึ่งจะทำให้เกิดความปั่นป่วนของลำเจ็ทสูงขึ้นในบริเวณนี้ ทำให้ค่าของความเร็วบริเวณนี้มีค่าที่ลดลง เมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีระยะที่เพิ่มขึ้นค่าความปั่นป่วนที่เกิดปรากฏการณ์ Vena contracta จะมีค่าน้อยลงทำให้ค่าความเร็วกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และจะลดลงเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.11 ในบริเวณ ($Y/W=0.25$) พบว่าค่าความเร็วมีลักษณะเริ่มต้นที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5.12 โดยตำแหน่งจุดฐานของซีพินเดี่ยวจะมีค่าเริ่มต้นที่สูงเนื่องจากในตำแหน่ง ($Y/W=0.25$) เป็นบริเวณช่องว่างของซีพินเดี่ยว ส่วนกรณีวัดที่จุดยอดของซีพินเดี่ยวค่าความเร็วเริ่มต้นมีค่าน้อยเพราะเป็นตำแหน่งที่มีซีพินปลาขวางการไหลอยู่ แต่เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้นกลับพบว่าค่าความเร็วในแนวแกนเจ็ทมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

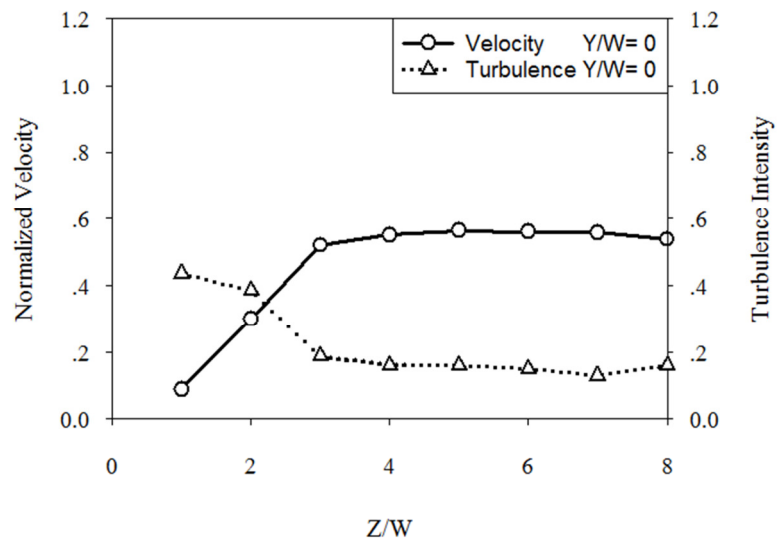
และส่วนสุดท้ายเป็นการหาค่าความยาวของ Potential core ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของเจ็ทซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วสูงสุด โดยจะมีความเร็วที่เท่ากับบริเวณปากทางออกเจ็ทและบริเวณที่ค่าความเร็วลดลงที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วสูงสุดเป็นบริเวณที่ Potential core เริ่มหมดตัวลง โดยกรณีปากทางออกปรกติมีความยาวของ Potential core สูงสุดเท่ากับ $7W$ รองลงมาเป็นกรณีปากทางออกติดตั้งซีพินเดี่ยวมีความยาวของ Potential core สูงสุดเท่ากับ $4W$ และกรณีติดตั้งแห่งทรงกระบอกมีความยาวของ Potential core สูงสุดเท่ากับ $1W$ โดยที่ระยะเหล่านี้เป็นระยะที่เกิดการหมดตัวลงของ Potential core ซึ่งทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงในบริเวณนี้



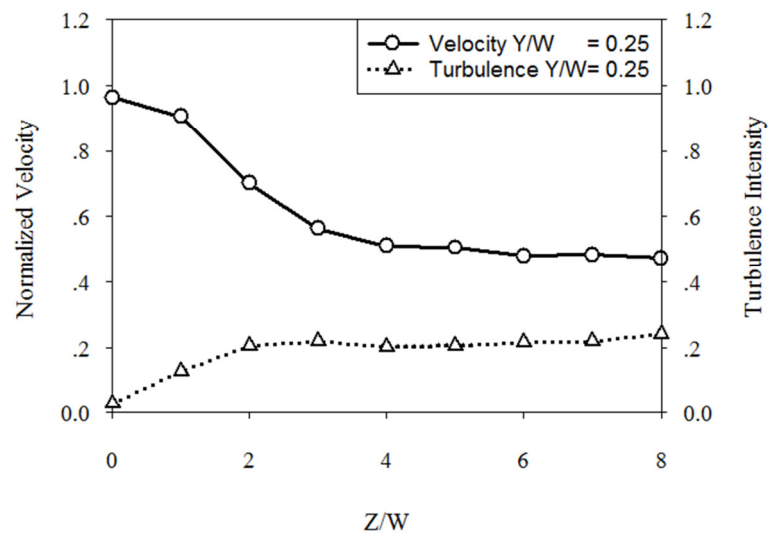
รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ท่อปากทางออกปรกติที่ตำแหน่ง ($Y/W=0$)



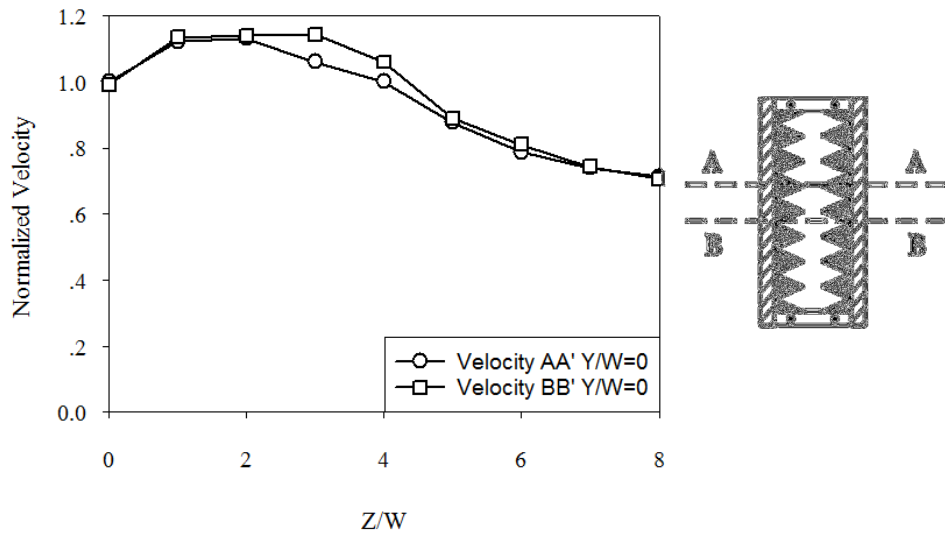
รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ท่อปากทางออกปรกติที่ตำแหน่ง ($Y/W=0.25$)



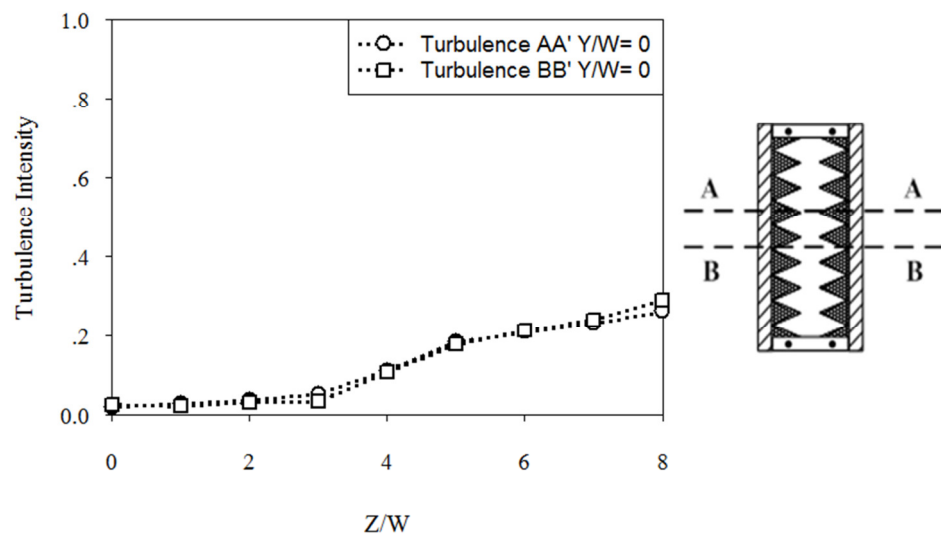
รูปที่ 5.8 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง (Y/W=0)



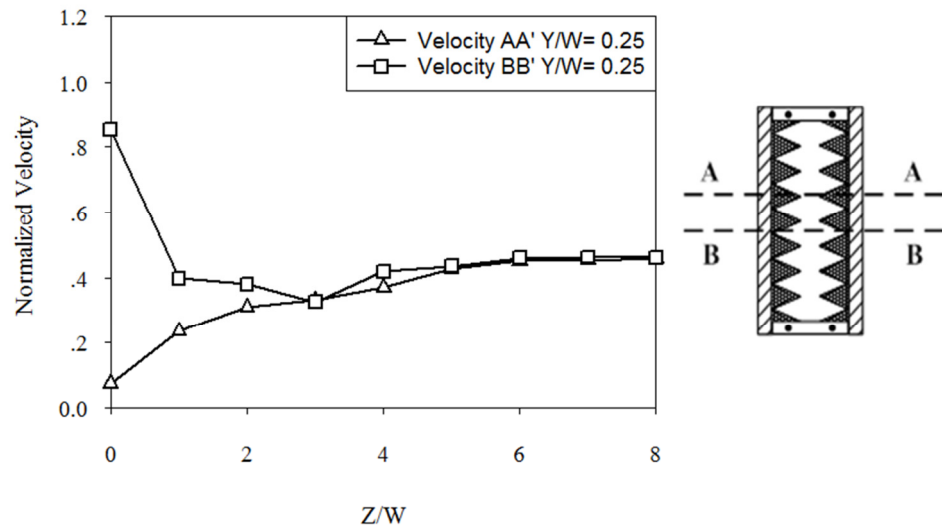
รูปที่ 5.9 การกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง (Y/W=0.25)



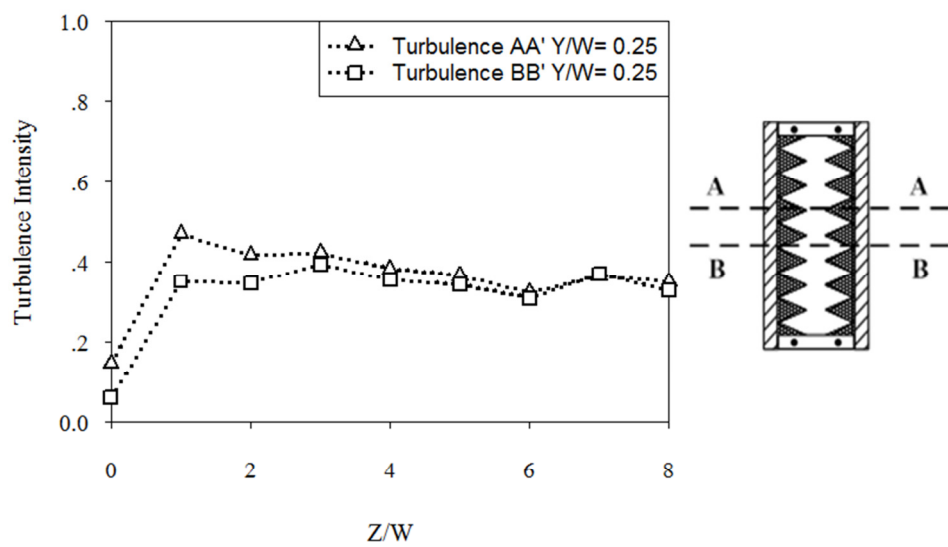
รูปที่ 5.10 การกระจายความเร็วของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ติดตั้งซี่ฟัน
 เลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง (Y/W=0)



รูปที่ 5.11 การกระจายความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ติดตั้ง
 ซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง (Y/W=0)



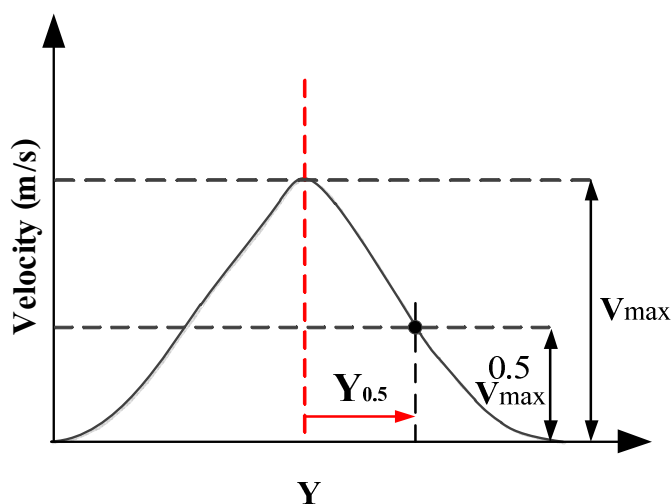
รูปที่ 5.12 การกระจายความเร็วของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0.25$)



รูปที่ 5.13 การกระจายความปั่นป่วนของลำเจ็ทอิสระในทิศทางตามแนวแกนเจ็ท (Z) กรณีที่ติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกที่ตำแหน่ง ($Y/W=0.25$)

5.1.3 การขยายตัวของเจ็ทอากาศอิสระตามแนวรัศมีในทิศทางแนวแกนเจ็ท (Z)

การขยายตัวของเจ็ทอากาศอิสระตามแนวความกว้างของท่อเจ็ทในทิศทางแนวแกนเจ็ท (Z) ในทั้ง 3 กรณีคือ ท่อแบบปากทางออกปรกติ ท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออก และท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออก โดยค่า $Y_{0.5}$ คือระยะความกว้างของลำเจ็ทในแนวแกน Y โดยการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างของท่อเจ็ทนี้จะคิดมาจากค่าครึ่งหนึ่งของความเร็วเจ็ทสูงสุดในแต่ละกรณีดังแสดงในรูปที่ 5.14 โดยได้มีการเปรียบเทียบผลการศึกษาเป็น 2 กรณีคือ



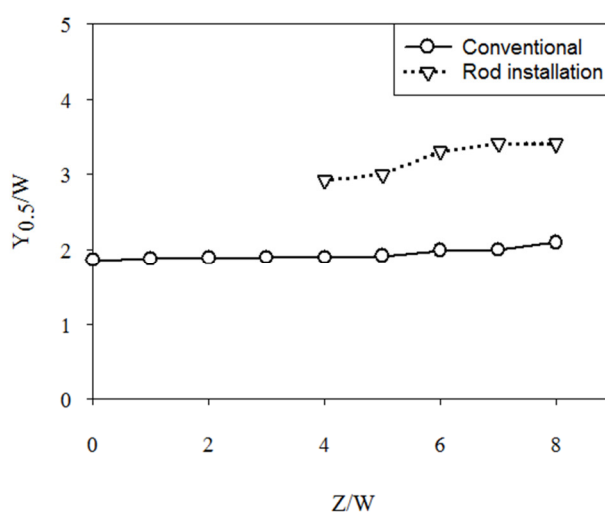
รูปที่ 5.14 แสดงระยะความกว้างของลำเจ็ทในแนวแกน Y ($Y_{0.5}$)

กรณีท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกเปรียบเทียบกับท่อแบบปากทางออกปรกติ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ที่ระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W < 4$) ผลของการไหลกรณีท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกจะเป็นการไหลที่ผ่านแท่งทรงกระบอกทำให้ไม่สามารถหาค่าได้ แต่เมื่อระยะห่างจากปากทางออกตั้งแต่ ($Z/W = 4$) เป็นต้นไปการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างของท่อเจ็ทนั้นจะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่ากรณีท่อแบบปากทางออกปรกติ โดยการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างของท่อเจ็ทแบบปรกตินั้นเริ่มต้นที่ระยะห่างจากปากทางออกต่ำจะมีการขยายตัวที่น้อยซึ่งจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นที่น้อยมากเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้น

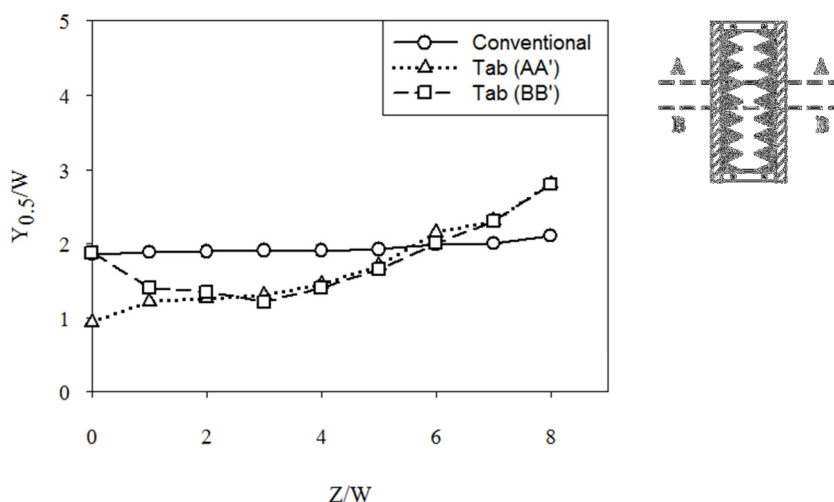
กรณีท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกเปรียบเทียบกับท่อแบบปากทางออกปรกติ ในช่วงระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W < 6$) จากการศึกษาพบว่า การขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างของท่อเจ็ทแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยจะมีค่าที่น้อยกว่าท่อแบบปากทางออกปรกติอยู่

มากและเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้นการขยายตัวของเจ็ทมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อระยะห่างจากปากทางออก ($Z/W > 6$) ดังแสดงในรูปที่ 5.16 การขยายตัวของเจ็ทของท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยนั้นมีค่าที่มากกว่าท่อแบบปากทางออกปกติ

โดยภาพรวมจากผลการศึกษการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวแกน Z หรือแนวความกว้างของท่อเจ็ทพบว่า กรณีเจ็ทจากท่อแบบปากทางออกปกติและท่อแบบติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกมีการขยายตัวต่ำกว่ากรณีเจ็ทจากท่อแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกอย่างเห็นได้ชัดซึ่งมีอัตราการขยายตัวสูงสุดที่ ($Z/W=7$)



รูปที่ 5.15 แสดงการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างของท่อเจ็ทเปรียบเทียบระหว่างเจ็ทปากทางออกปกติกับปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอก



รูปที่ 5.16 แสดงการขยายตัวของเจ็ทอิสระตามแนวความกว้างของท่อเจ็ทเปรียบเทียบระหว่างเจ็ทปากทางออกปกติกับปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อย

5.2 การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยในรายละเอียดของหัวข้อนี้จะอธิบายผลของลักษณะการกระจายน้ำเสลดน์นมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและเปรียบเทียบการกระจายน้ำเสลดน์นมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน หลังจากนั้นจะอธิบายผลของการเปรียบเทียบค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน เมื่อเพิ่มระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อให้เข้าใจลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว

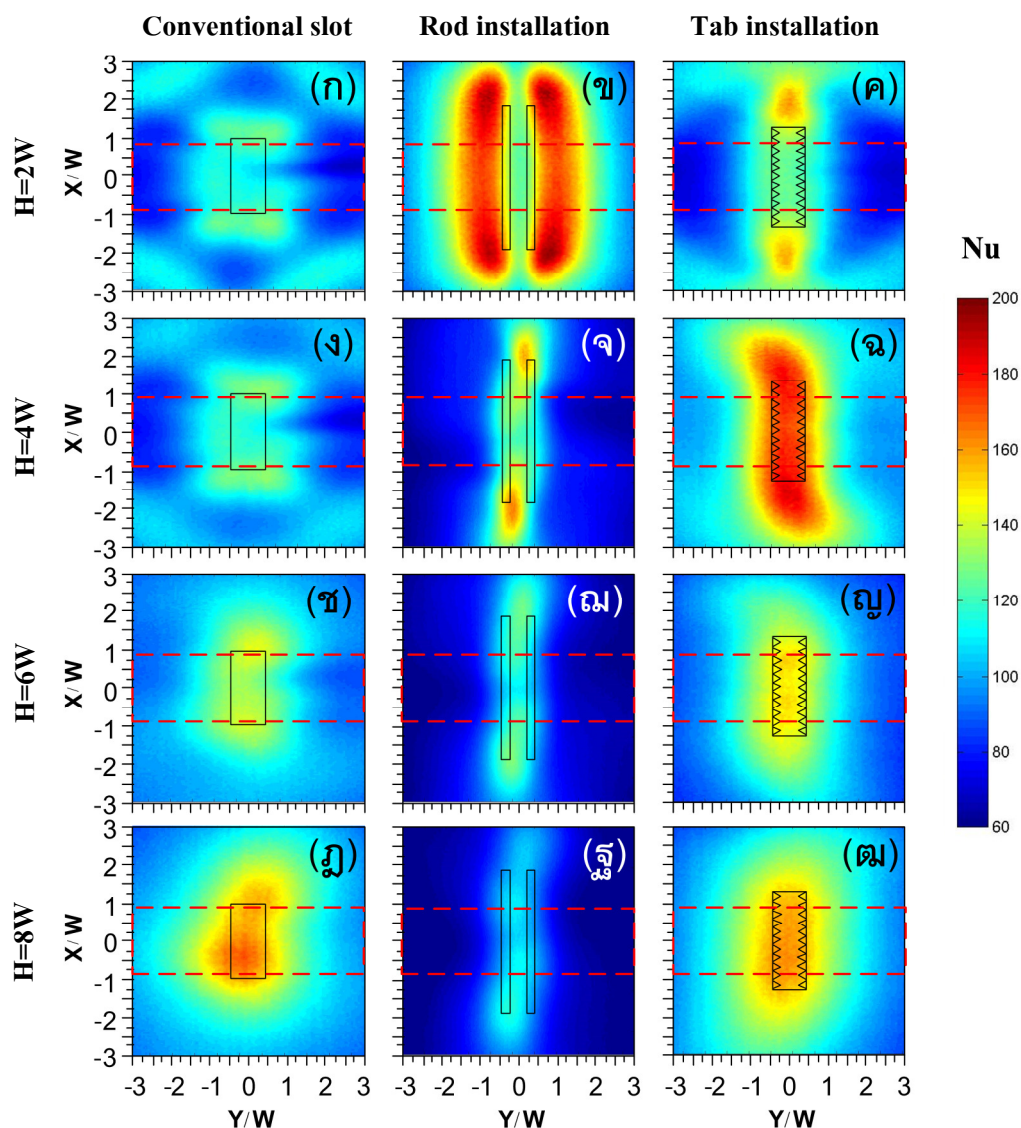
5.2.1 การศึกษาลักษณะการกระจายของน้ำเสลดน์นมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะการกระจายของน้ำเสลดน์นมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในกรณีปากทางออกทั้ง 3 แบบคือ กรณีปากทางออกเจ็ทแบบปรกติ กรณีปากทางออกเจ็ทแบบติดตั้งแท่งกันทรงกระบอกและกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อย ที่เงื่อนไขระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2W$ $4W$ $6W$ และ $8W$ ตามลำดับ

กรณีปากทางออกแบบปรกติดังรูปที่ 5.17(ก) (ง) (ข) และ (ฉ) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ระยะห่างจากปากทางออกมีค่าน้อยค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงสุดจะปรากฏบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพียงจุดเดียวเท่านั้นและจะมีค่าที่ต่ำ แต่เมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงสุดจะปรากฏบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพียงจุดเดียวเช่นเดิมแต่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

กรณีปากทางออกติดตั้งแท่งกันทรงกระบอกดังรูปที่ 5.17(ข) (จ) (ฉ) และ(ง) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2W$ จะปรากฏบริเวณที่มีค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงสุด (Peak) อยู่สองบริเวณเนื่องจากการแยกตัวของลำเจ็ทและมีการพุ่งชนพื้นผิวในลักษณะทำมุมเอียงกับพื้นผิว และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีระยะที่เพิ่มขึ้นบริเวณที่มีค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงสุดจะปรากฏบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพียงจุดเดียวเท่านั้น โดยที่เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงสุดจะมีค่าที่ต่ำลง

กรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยดังรูปที่ 5.17(ค), (ฉ), (ญ) และ(ฒ) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าน้อย ($H=2W$) ค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงจะมีค่าที่ต่ำและเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น และที่ระยะ $H=4W$ ค่าน้ำเสลดน์นมเบอร์สูงสุดเมื่อเทียบกับระยะห่างอื่นของกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออก



รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชน

($Re=15,000$)

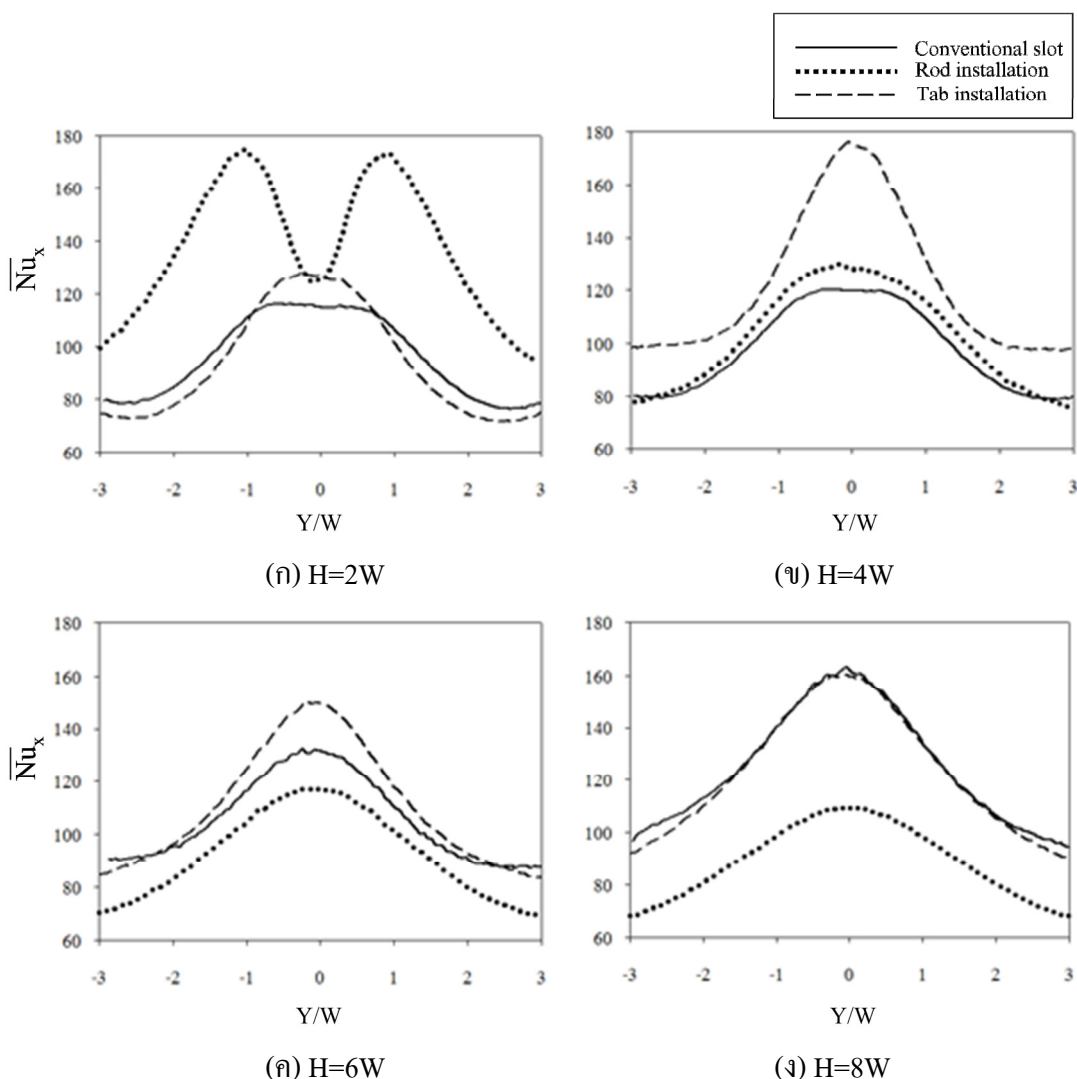
โดยภาพรวมนัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และจะค่อยๆ ลดลงตามแนวความกว้างท่อเจ็ทยกเว้นกรณีของปากทางออกแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอก $H=2W$ ที่ค่า นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดมีอยู่ 2 บริเวณเนื่องจากมีลำเจ็ทออกมาพุ่งชนพื้นผิวใน 2 บริเวณ แต่เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ($H=4W$) เป็นต้น นัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเนื่องจากเกิดการรวมตัวของลำเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว โดยกรณีปากทางออกแบบปรกติค่า นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดจะอยู่ที่ระยะ $H=8W$ และกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยค่า นัสเซิลต์นัมเบอร์สูงสุดจะอยู่ที่ระยะ $H=4W$

5.2.2 การเปรียบเทียบการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยตามแนวแกน X ผ่านจุดศูนย์กลางบนพื้นผิว (\overline{Nu}_x)

สำหรับการเปรียบเทียบการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนในแนวแกน X นั้น เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าน้ำเสียดัน้เบอ์ให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยจะเปรียบเทียบการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่บริเวณระยะ $-0.75 \leq X/W \leq 0.75$ ที่เจ็ทพุ่งชนเพื่อให้ผลครอบคลุมเฉพาะบริเวณตำแหน่งของปากทางออกเจ็ทในทุกกรณีของปากทางออกเจ็ท

รูปที่ 5.18 แสดงการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยแบ่งระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนออกเป็น 4 ช่วงคือ ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนพุ่งชน $H=2W$ จากผลการทดลองการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกรณีปากทางออกแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกจะมีค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางสูงสุด ซึ่งจะมีจุดสูงสุดของค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางอยู่ 2 ตำแหน่งโดยเป็นผลมาจากการแยกตัวของลำเจ็ทเมื่อไหลผ่านแท่งกันทรงกระบอกพุ่งชนพื้นผิวทันทีและตำแหน่งที่ห่างออกจากจุดศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางจะมีค่าที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยและปากทางออกปรกติพบว่าค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางมีค่าสูงสุดเฉพาะตำแหน่งตรงกลางปากทางออกเจ็ทโดยที่ค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางของกรณีปากทางออกปรกติและกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยนั้นมีค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางกรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 5.18(ก)

ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนพุ่งชน $H=4W$ จากผลการทดลองการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวผ่านจุดศูนย์กลางของปากทางออกในทุกกรณีมีค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางสูงสุดบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและเมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางจะมีค่าที่น้อยลงตามลำดับ โดยกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยจะมีค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางสูงสุดที่ระยะห่างจากปากทางออก $H=4W$ เมื่อเปรียบเทียบกับปากทางออกกรณีติดตั้งแท่งทรงกระบอกและปากทางออกปรกติ ซึ่งในส่วนของปากทางออกแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอกนั้นค่าน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางมีค่าสูงที่จุดศูนย์กลางเนื่องมาจากการรวมตัวกันของลำเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 5.18(ข)



รูปที่ 5.18 การกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทอากาศพุ่งชน
ในแนวแกน X ($Re=15,000$)

ที่ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนพุ่งชน $H=6W$ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวผ่านจุดศูนย์กลางของปากทางออกในทุกกรณีมีค่าเฉลี่ยผ่านจุดศูนย์กลางสูงสุดบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและเมื่อระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นค่าเฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางจะมีค่าที่น้อยลงตามลำดับ โดยกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยจะมีค่าเฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางสูงสุดแต่มีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยที่ระยะ $H=4W$ ในกรณีปากทางออกแบบปรกติค่าเฉลี่ยที่ผ่านจุดศูนย์กลางมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปากทางออกปรกติที่ระยะ $H=2W$ และ $H=4W$ และกรณีปากทางออกแบบติดตั้งแท่งทรงกระบอก

บทที่ 6

สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทจากท่อปากทางออกหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งแท่งทรงกระบอกขวางการไหลและแผ่นซี่ฟันเลื่อยที่ปากทางออกเจ็ท เพื่อเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน และศึกษาปากทางออกแบบปรกติเพื่อเปรียบเทียบ โดยปากทางออกของเจ็ทแต่ละแบบกำหนดให้ความกว้างของปากทางออกเจ็ทคงที่ ($W=40$ mm) และพื้นที่ปากทางออกของเจ็ทเท่ากันทุกกรณี

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งศึกษาสมบัติการไหลของเจ็ทอากาศอิสระโดยใช้หัววัดแบบลวดร้อนวัดการกระจายตัวของความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทอากาศอิสระ ส่วนที่สองศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=2W$ $4W$ $6W$ และ $8W$ โดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared camera) วัดการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวและคำนวณการกระจายนั้สเชิลด์นั้มเบอร์บนพื้นผิว ส่วนที่สามศึกษาการไหลของเจ็ทอากาศที่พุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ (ANSYS Ver.13.0) เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยทุกกรณีกำหนดให้เรย์โนลด์นั้มเบอร์ของเจ็ทอากาศคงที่ $Re=15,000$ ส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนด้วยวิธีเชิงทัศนั้ Laser Induced Fluorescence (LIF) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวจากปากทางออกทั้ง 3 แบบ โดยกำหนดให้เรย์โนลด์นั้มเบอร์ของเจ็ทน้ำคงที่ $Re=3,200$

จากผลการศึกษารูปได้ดังนี้

(1) จากผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศอิสระตามแนวแกนเจ็ทซึ่งเปรียบเทียบระหว่างท่อแบบปรับแต่งปากทางออกกับท่อปากทางออกปรกติ สามารถสรุปเป็นหัวข้อสำคัญใน 3 ส่วนดังนี้

ส่วนแรกความปั่นป่วนในแนวแกนเจ็ท กรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ระยะ $H=1W$ มีความปั่นป่วนสูงสุดโดยเป็นบริเวณด้านหลังใกล้กับแท่งทรงกระบอกซึ่งบริเวณนี้เกิดการหมุนวนของเจ็ทที่เกิดจากปรากฏการณ์ von Karman vortex street และพบว่าความปั่นป่วนมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้นระยะ ($H=3W$ ถึง $8W$) ส่วนกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยและกรณีปากทางออกปรกติพบว่าความปั่นป่วนทั้ง 2 กรณีมีค่าต่ำที่ระยะห่างจากปาก

ทางออกที่น้อยโดยที่กรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยความปั่นป่วนเริ่มสูงขึ้นตั้งแต่ระยะ $H=3W$ เป็นต้นไป แต่กรณีปากทางออกปรกติความปั่นป่วนสูงขึ้นตั้งแต่ระยะ $H=5W$ เป็นต้นไป และมีความปั่นป่วนสูงสุดทั้ง 2 กรณีที่ระยะ $H=8W$ โดยที่กรณีติดตั้งซี่ฟันปลามีค่าที่สูงกว่ามาก

ส่วนที่สองเป็นการขยายตัวของลำเจ็ทในแนวแกนเจ็ทโดยคิดมาจากค่าครึ่งหนึ่งของความเร็วเจ็ทสูงสุดในแต่ละกรณี ที่กรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอกพบว่าการขยายตัวมีค่าที่สูงกว่ากรณีท่อปรกติสูงมากในทุกระยะห่างจากปากทางออกโดยมีค่าสูงสุดที่ระยะ $H=8W$ และกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยพบว่าที่ระยะ ($H=0W$ ถึง $5W$) กรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยมีค่าต่ำกว่าท่อปรกติ และเมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มสูงขึ้นการขยายตัวจะมีค่าเพิ่มที่สูงขึ้นจนที่ระยะ $H=6W$ การขยายตัวกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยมีค่าใกล้เคียงกับท่อปรกติ และที่ระยะ $H>6W$ การขยายตัวกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยมีค่าที่สูงกว่าท่อปรกติโดยมีค่าสูงสุดที่ $H=8W$

และส่วนสุดท้ายเป็นค่าความยาวของ Potential core ซึ่งคิดจาก 95 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วยุติสูงสุดพบว่า กรณีปากทางออกปรกติมีความยาวของ Potential core สูงสุดเท่ากับ $7W$ รองลงมาเป็นกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยมีความยาวของ Potential core เท่ากับ $4W$ และกรณีติดตั้งแท่งทรงกระบอกมีความยาวของ Potential core เท่ากับ $1W$

(2) จากผลการศึกษการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยภาพรวมพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงบริเวณตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและจะค่อยๆลดลงตามแนวความกว้างท่อเจ็ท โดยกรณีปากทางออกติดตั้งแท่งทรงกระบอกให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ระยะ $H=2W$ โดยจะมีการแบ่งของลำเจ็ทออกเป็น 2 ส่วนพุ่งชนในแนวเฉียงทำมุมกับพื้นผิวเกิดแรงเฉือนบนพื้นผิวที่สูง ส่งผลให้ในเชิงปริมาณอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่ากรณีปากทางออกปรกติ 33.33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเพิ่มขึ้น ($H=4W$ ถึง $8W$) พบว่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าที่ลดลงตามลำดับเนื่องจากเกิด wake ด้านหลังแท่งทรงกระบอกทำให้สูญเสียโมเมนตัมในขณะที่พุ่งชน ส่วนในกรณีปากทางออกติดตั้งซี่ฟันเลื่อยการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีลักษณะคล้ายกับปากทางออกปรกติคือการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างจากปากทางออกมีระยะที่เพิ่มขึ้น แต่ที่ระยะ $H=4W$ การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีติดตั้งซี่ฟันเลื่อยเพิ่มสูงขึ้นโดยเกิดจากปรากฏการณ์ Vena contracta ซึ่งทำให้ความเร็วของเจ็ทมีค่าสูงที่บริเวณนี้และเป็นบริเวณที่หมดตัวลงของ Potential core ส่งผลให้ในเชิงปริมาณอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่ากรณีปากทางออกปรกติ 20 เปอร์เซ็นต์

(3) การศึกษการไหลของเจ็ทอากาศที่พุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ (ANSYS Ver.13.0) เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่

เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน กรณีปากทางออกติดตั้งห่างทรงกระบอกสามารถสังเกตได้ชัดเจนว่า ค่าความเร็วที่ด้านหลังห่างทรงกระบอกมีค่าที่ต่ำกว่าแบบอื่นเนื่องจากเกิด wake ที่ด้านหลังห่างทรงกระบอก ในกรณีปากทางออกติดตั้งซึ่งพื้นเลื่อยพบว่าค่าความปั่นป่วนจะมีค่าที่สูงกว่าปากทางออกแบบอื่นตั้งแต่ระยะ $H=4W$ เป็นต้นไปเนื่องจากการรบกวนของ Shear layer ที่เกิดจากการไหลผ่านซึ่งพื้นเลื่อยส่งผลให้มีค่าความปั่นป่วนที่สูง และในกรณีปากทางออกปรกติพบว่าในทุกระยะห่างจากปากทางออกในบริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ทยังไม่เกิดความปั่นป่วนซึ่งแตกต่างจากกรณีอื่น

(4) การศึกษาการไหลของเจ็ทน้ำพุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีเชิงทัศนด้วยวิธี Laser Induced Fluorescence (LIF) จากการศึกษาพบว่ากรณีปากทางออกติดตั้งห่างทรงกระบอกจะเกิด wake ก่อนการพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดการผสมกันของลำเจ็ทและน้ำบริเวณรอบที่สูงกว่ากรณีปากทางออกปรกติ และกรณีปากทางออกติดตั้งซึ่งพื้นเลื่อยพบว่าลำเจ็ทมีการขยายตัวที่น้อยเมื่อเทียบกับกรณีปากทางออกปรกติแต่เกิดการผสมกันของลำเจ็ทและน้ำบริเวณรอบที่ระยะน้อยกว่าปากทางออกปรกติโดยที่การเกิดการผสมกันของลำเจ็ทและน้ำบริเวณรอบกรณีติดตั้งซึ่งพื้นเลื่อยเริ่มเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนที่ระยะ $H=2W$ แต่กรณีปากทางออกปรกติเริ่มเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนที่ระยะ $H=6W$

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการไหลของเจ็ทอิสระและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ของท่อเจ็ทแบบปากทางออกสี่เหลี่ยมที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่บริเวณปากทางออกเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้น ในการศึกษาขั้นต่อไปอาจจะต้องปรับปรุงขอบเขตในการทำวิจัยหรือประยุกต์ใช้งานดังนี้

(1) ศึกษาผลของระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในกรณีที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นเนื่องจากผลการทดลองความเร็วและความปั่นป่วนเจ็ทอิสระนั้นกรณีปากทางออกติดตั้งห่างทรงกระบอกที่ระยะ $H=1W$ อาจให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่สูงกว่าที่ระยะ $H=2W$ และกรณีปากทางออกติดตั้งซึ่งพื้นเลื่อยที่ระยะ $H=3W$ อาจให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่สูงกว่าที่ระยะ $H=4W$ เนื่องจากมีค่าความเร็วและความปั่นป่วนของเจ็ทที่สูง

(2) ศึกษาผลของเรย์โนลด์สนัมเบอร์ที่มีต่อลักษณะการไหลการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่ง

(3) หัวฉีดกรณีปากทางออกติดตั้งห่างทรงกระบอกอาจประยุกต์ใช้งานในกรณีที่ต้องการเพิ่มการผสมของของไหล

บรรณานุกรม

- [1] Zdenek, T.; Vaclav, T. Annular impinging jet with recirculation zone expanded by acoustic excitation. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. **2004**, *47*, 2329–2341.
- [2] Herbert, M.H.; Daniela, L.M. Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. **2007**, *50*, 3638–3648.
- [3] Huang, L.; EI-Genk, M.S. Heat transfer and flow visualization experiments of swirling multi-channel and conventional impinging jet. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. **1998**, *41*, 583-600.
- [4] Viskanta R., , Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **1993**, *6*, 111-134.
- [5] Zuckermann, N.; Lior, N. *Advanced heat transfer: Jet impingement heat transfer*, 39.; Elsevier: Philadelphia, 2006
- [6] Ashforth-Frost, S.; Jambunathan, K. Effect of nozzle geometry and semicon finement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet. *Int. J. Heat Mass Transfer*. **1996**, *23*, 155–162.
- [7] Abe, K. and Suga, K. Large eddy simulation of passive scalar in complex turbulence with flow impingement and flow separation. *Heat Transfer – Asian Res*. **2001**, *30*, 402–418
- [8] Baughn, J.W.; Shimizu, S. Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. *Exp. Heat Transfer*. **1998**, *111*, 1096–1098.
- [9] Levi A. Direct jet impingement-assisted thermosyphon cooling apparatus and method US. Patent 7,885,074 B2, Jun 25, 2009.
- [10] Hideki T. High speed oven using a jet of heated air US. Patent 6,218,650 B1, Apr 16, 1999.
- [11] Ravinder K. Jet impingement solar collector US. Patent 4,201,195 A, Oct 25, 1978.
- [12] Albert J. Dual conveyor jet impingement oven US. Patent 6,880,545 B2, Aug 28, 2003.
- [13] Ercan, M. Jet impingement heat exchanger apparatus and power electronics modules. U.S. Patent 8,199,505, Jun 12, 2012.
- [14] Ashforth-Frost, S.; Jambunathan, K.; Whitney, C.F. Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet. *Exp. Thermal Fluid Sci*. **1997**, *14*, 60–67

- [15] Mirosław, Zukowski. Heat transfer performance of a confined single slot jet of air impinging on a flat surface, *Int. J. Heat and Mass Transfer*. **2013**, *57*, 484–490.
- [16] Fabio Gori, Ivano Petracchi, Matteo Angelino. Flow evolution of a turbulent submerged two-dimensional rectangular free jet of air. Average Particle Image Velocimetry (PIV) visualizations and measurements, *Int. J. Heat and Fluid Flow*. **2013**, *44*, 764–775
- [17] Mi, J., and Nathan, G.J. Effect of small vortex-generators on scalar mixing in the developing region of a turbulent jet. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **1999**, *42*, 3919-3926.
- [18] Gao, N., Sun, H. and Ewing, D., 2003, Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. **2003**, *46*, 2557-2569.
- [19] Wang, X.K., Chua, L.P., Yu, S.C.X.. On the near-field of a square jet with vortex generating tabs. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. **2003**, *32*, 99-117.
- [20] Ya-Wen Chou., Fei-Bin Hsiao., Cheng-Chiang Hsu. Vortex dynamics and energy transport of a plane jet impinging upon a small cylinder, *Experimental Thermal and Fluid Science*. **2002**, *26*, 445-454.
- [21] Colucci, D.W.; Viskanta. R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Exp. Thermal Fluid Sci*. **1996**, *13*, 71–81.
- [22] Emissivity values for common materials, Available: <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>. (Accessed: May 02, 2014)
- [23] Ansys fluent, version 12.0; Theory guide, Ansys Inc: Canonsburg, Pennsylvania, United States. (Accessed January 29, 2009)
- [24] Zhou, D.W.; Lee, S.J. Heat transfer enhancement of impinging jets using mesh screens. *Int. J. Heat and Mass Transfer* **2004**, *47*, 2097-2108.
- [25] Nathan, G.J.; Hill, S.J.; Luxton, R.E. An axisymmetric fluidic nozzle to generate jet precession. *J. Fluid Mech*, **1998**, *370*, 347-380.
- [26] Cooper, D.; Jackson, C.; Launder, B.E.; Liao, G.X. Impinging jet studies for turbulence model assessment flow-field experiments. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1993, *36*, 2675–2684.
- [27] Kataoka, K. Impingement heat transfer augmentation due to large scale eddies. *Int. Heat Transfer Conf*. **1990**, 255–273.

ภาคผนวก ก.

บทความสำหรับเผยแพร่ 1

“อิทธิพลของการติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกเจ็ทต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบน
พื้นผิวที่เจ็ทจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมพุงชน”

การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน
และกระบวนการ ครั้งที่ 13

ภาคผนวก ข.

บทความสำหรับเผยแพร่ 2

“การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ้าฟุ้งชนจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ที่มีการติดตั้งซี่ฟันปลาที่ปากทางออก”

การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน
และกระบวนการ ครั้งที่ 14

ภาคผนวก ค.

บทความสำหรับเผยแพร่ 3

“Heat Transfer Augmentation for Impinging Jet from Slot Nozzle
Installed With Cylindrical Rod”

The 25th International Symposium on Transport Phenomena

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอภิชาติ ศรีไชยรัตน์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5610120043	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2555

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อภิชาติ ศรีไชยรัตน์, มัถคาร์ แวหะยี่, ภาสกร เวสสะโกศล,ชยุต นันทดุสิต, 2557, “อิทธิพลของการติดตั้งแท่งทรงกระบอกที่ปากทางออกเจ็ทต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมพุ่งชน” การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 13

อภิชาติ ศรีไชยรัตน์, มัถคาร์ แวหะยี่, ภาสกร เวสสะโกศล,ชยุต นันทดุสิต, 2558, “การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการติดตั้งซี่ฟันปลาที่ปากทางออก” การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 14

Apichit. Srichairattana, Makatar. Wae-hayee, Passakorn. Vessakosol Chayut. Nuntadusit, 2014, “Heat Transfer Augmentation for Impinging Jet from Slot Nozzle Installed With Cylindrical Rod” The 25th International Symposium on Transport Phenomena