



การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจาก
ท่อเจ็ทที่ติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from
Pipe Nozzle Installed with Air-Induced Duct

ณัฐพร แก้วชูทอง

Natthaporn Kaewchoothong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2557

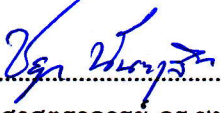
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน
จากท่อเจ็ทที่ติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

ผู้เขียน นายณัฐพร แก้วชูทอง

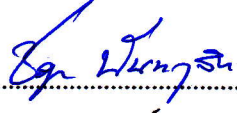
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

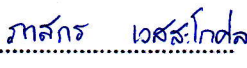

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทกุล)

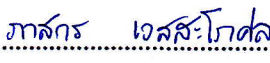
คณะกรรมการสอบ



.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ ทวีกุล)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


.....
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)


.....กรรมการ
(ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)


.....กรรมการ
(ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสะอาด)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

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

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อเจ็ท
ที่ติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

ผู้เขียน นายณัฐพร แก้วชูทอง

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยติดตั้งท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศและติดตั้งปลอกท่อที่ปากทางออกเจ็ท ในการทดลองกำหนดให้ท่อเจ็ทมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $d=17.2$ mm ในกรณี
ที่ติดตั้งท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ ได้กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความยาวของท่อขยายหน้าตัดเท่ากับ $D=4d$ และ $L=4d$ ตามลำดับ และกำหนดจำนวนรูเหนี่ยวนำอากาศมีจำนวน 4, 6 และ 8 รู โดยที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $H=4d$, $6d$ และ $8d$ สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทกำหนดให้คงที่ $Re=20,000$ ในกรณีการติดตั้งปลอกท่อ ได้กำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความยาวของปลอกท่ออยู่ในช่วง $D=2d$, $3.3d$, $4d$, $6d$, $8d$ และ $L=2d$, $4d$ และ $6d$ ตามลำดับ โดยที่ระยะจากปากทางออกของท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วง $H=4d$, $6d$, $8d$, $10d$ และ $12d$ สำหรับของเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง $Re=10,000$, $15,000$, $20,000$, $25,000$ และ $30,000$ นอกจากนี้ได้ศึกษากรณีเจ็ทพุ่งชนจากหัวฉีดแบบท่อปกติ (ไม่ติดตั้งท่อขยายหน้าตัดและปลอกท่อ) เพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับสองกรณีแรก ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวได้ใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (ANSYS version 13.0, Fluent) สำหรับการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้กล้องอินฟราเรดวัดอุณหภูมิที่กระจายบนพื้นผิว นอกจากนี้ได้วัดการกระจายความเร็วของเจ็ทโดยใช้เครื่องวัดความเร็วแบบลวดร้อน

จากผลการศึกษาพบว่า กรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศแบบ 4 รู และแบบไม่มีรูเหนี่ยวนำอากาศ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไม่แตกต่างกันนักเมื่อเทียบจากกรณีแบบท่อปกติ เมื่อเพิ่มจำนวนรูเจาะเหนี่ยวนำอากาศเป็น 6 และ 8 รู พบว่า ไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น สำหรับลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศพบว่า ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ มีการดึงอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทภายในท่อขยายหน้าตัดมากขึ้น แต่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น $H=6d$ และ $8d$ พบว่า อากาศบางส่วนไหลย้อนกลับเข้ามาผสมภายในท่อขยายหน้าตัด

สำหรับผลการศึกษากรณีของการติดตั้งปลอกท่อที่เงื่อนไขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในปลอกท่อ $D=2d$, $3.3d$ และ $4d$ และระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ และ $6d$ พบว่า มีการดึงอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทภายในปลอกท่อมากขึ้น ทำให้ความเร็วในแนวแกนเจ็ทเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงขึ้น แต่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ท

ถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น $H=8d$, $10d$ และ $12d$ จะมีอากาศบางส่วนไหลย้อนกลับเข้ามาผสมภายในปลอกท่อ ทำให้ความเร็วในแนวแกนเจ็ทลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลง สำหรับที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความยาวของปลอกท่อ $D=4d$ และ $L=2d$ ตามลำดับ โดยที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ ให้น้สเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวสูงสุด ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 25.42% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

จากการเปรียบเทียบผลทั้งสองกรณีข้างต้นโดยภาพรวมพบว่า กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ สามารถให้น้สเชลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีการติดตั้งท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ เนื่องจากกรณีการติดตั้งปลอกท่อที่ปากทางออกเจ็ทสามารถช่วยดึงอากาศเข้ามาผสมภายในปลอกท่อได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ความเร็วของลำเจ็ทเพิ่มขึ้น

Thesis Title Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Pipe Nozzle Installed with Air-Induced Duct
Author Mr. Natthaporn Kaewchoothong
Major Program Mechanical Engineering
Academic Year 2014

ABSTRACT

The aim of this research is to study flow and heat transfer characteristics on the surface of impinging jet with installing an expansion pipe drilled entrainment holes and the sleeve pipe at the nozzle exit. In the investigation, the internal diameter of main pipe nozzle was $d=17.2$ mm. In the case of expansion pipe installation with drilling entrainment holes, the internal diameter and the length of expansion pipe were $D=4d$ and $L=2d$, respectively. The number of entrainment holes was 4, 6 and 8. The jet-to-plate distance was $H=4d$, $6d$ and $8d$. The jet Reynolds number was fixed at $Re=20,000$. In the case of sleeve pipe installation, the internal diameter and the length of expansion pipe were varied in the range of $D=2d$, $3.3d$, $4d$, $6d$, $8d$ and $L=2d$, $4d$, $6d$, respectively. The jet-to-plate distance were varied at $H=4d$, $6d$, $8d$, $10d$ and $12d$. The jet Reynolds number was also varied at $Re=10,000$, $15,000$, $20,000$, $25,000$ and $30,000$. In addition, the impinging jet from conventional pipe (without installing an expansion pipe drilled entrainment holes and the sleeve pipe) was also investigated to compare the results with the both cases. The flow characteristics of impinging jet were investigated using computational fluid dynamics (ANSYS version 13.0, Fluent). The heat transfer characteristics on the impinged surface were studied by measuring temperature distributions using infrared camera. In addition, the velocity distributions of jet were investigated by using hot-wire anemometry.

The results show that, in the case of impinging jet from expansion pipe installation with 4 entrainment holes and without entrainment hole, the heat transfer characteristics were quite similar to the case of conventional pipe. The increasing of number of entrainment holes as 6 and 8 holes wasn't effect on enhancement heat transfer on the impinged surface. The flow characteristics of impinging jet from pipe with expansion pipe installation drilled entrainment holes was found that at jet-to-plate distance $H=4d$, the entrainment of ambient air mixing with the jet flow within expansion pipe was increased. However, the increase of jet-to-plate distance, $H=6d$ and $8d$, it was found that the spent air returned into the

expansion pipe and then mixed with the jet flow.

For the case of installing the sleeve pipe, the inner diameter of sleeve pipe $D=2d$, $3.3d$ and $4d$ at jet-to-plate distance $H=4d$ and $6d$, it was found that the entrainment of surrounding air into the sleeve pipe was increased. It cases to increase axial jet velocity and heat transfer rate on the impingement surface. However, the increase of jet-to-plate distance $H=8d$, $10d$ and $12d$, a part of spent air returned into the expansion pipe. It cases to decrease axial jet velocity and heat transfer rate on the impingement surface. Particularly, at the inner diameter and the length of sleeve pipe $D=4d$ and $L=2d$, respectively, and the jet-to-plate distance $H=4d$, the average Nusselt number on the impingement surface was the largest by getting to be higher 25.42% than the case of conventional pipe.

The comparison of the both cases was found that the average Nusselt number of the impinging jet from sleeve pipe installation was higher than the case the expansion pipe installation because the sleeve pipe installation at jet exit can more enhance the entrainment of surrounding fluid into the jet flow within sleeve pipe. It cases to increase axial jet velocity

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสนอแนวทางการทำวิจัย และเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ ทวีกุล ดร.ภาสกร เวสสะโกศล ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด ที่ให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้อง สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณอาจารย์ บุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่าน ที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ณัฐพร แก้วชูทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (THAI)	(5)
บทคัดย่อ (ENGLISH)	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(12)
รายการภาพประกอบ	(13)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(17)
รายการผลงานที่ตีพิมพ์และประชุมวิชาการ	(20)
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 ทบทวนบทความที่เกี่ยวข้อง	7
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	14
2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	
2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	14
2.2 ขอบเขตของงานวิจัย	14
3. ขั้นตอนการวิจัย	
3.1 แบบจำลองในการทดลอง	15
3.1.1 แบบจำลองเจ็ทพุงชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนำอากาศ	15
3.1.2 แบบจำลองของเจ็ทพุงชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนือวนำอากาศ	16
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	17
3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว	18
3.3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	18
3.3.2 วิธีการทดลอง	20
3.3.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว	23
3.4 การวัดการกระจายความเร็วและความปั่นป่วน	24
3.4.1 รายละเอียดของชุดทดลอง	24
3.4.2 การสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	25
3.4.3 วิธีการทดลอง	26
4. การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	
4.1 สมการควบคุมการไหล	28
4.2 แบบจำลองความปั่นป่วน	29
4.3 การไหลบริเวณชั้นขีดผนัง	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การสร้างแบบจำลอง	32
4.5 การสร้างกริด	33
4.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	35
4.7 วิธีการคำนวณ	36
5. ผลการทดลองและอภิปรายผล	
5.1 กรณีศึกษาเจ็ทพุงชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ	37
5.1.1 ลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน	37
5.1.2 ลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุงชน	39
5.1.3 เส้นทางความเร็วจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุงชนพื้นผิว	40
5.1.4 กระจายความเร็วเจ็ทในแนวแกนเจ็ทจากการจำลองลักษณะการไหล	41
5.1.5 การกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุงชนจากการจำลองลักษณะการไหล	41
5.2 กรณีศึกษาเจ็ทพุงชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ	42
5.2.1 ลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน	42
5.2.2 ลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุงชน	47
5.2.3 ลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุงชน	50
5.2.4 เส้นทางความเร็วจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุงชนพื้นผิว	55
5.2.5 การกระจายความเร็วและพลังงานความปั่นป่วนภายในหน้าตัดเจ็ท	59
5.2.6 ลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	62
5.2.7 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนสำหรับเจ็ทพุงชนแบบติดตั้งปลอกท่อ	66
6. สรุปผลการวิจัย	
6.1 สรุปผลการวิจัย	68
6.1.1 กรณีเจ็ทพุงชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ	68
6.1.2 กรณีเจ็ทพุงชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ	68
6.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก ก. บทความสำหรับเผยแพร่ 1	73
ภาคผนวก ข. บทความสำหรับเผยแพร่ 2	82
ภาคผนวก ค. สิทธิบัตร	88
ประวัติผู้เขียน	100

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง	18
ตารางที่ 2 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization	36

รายการภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1	แสดงการติดครีป (Fin) ลงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	1
รูปที่ 2	แสดงชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว	2
รูปที่ 3	แสดงลักษณะการไหลผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulator)	3
รูปที่ 4	แสดงวิธีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน	5
รูปที่ 5	แสดงตัวอย่างการระบายความร้อนใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ	6
รูปที่ 6	แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลแบบกระตุ้น (Active control)	6
รูปที่ 7	แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลแบบไม่มีการกระตุ้น (Passive control)	6
รูปที่ 8	แสดงโครงสร้างของเจ็ทแบบสล้อตที่ใช้ในการทดลองของ Ashforth-Frost และคณะ	7
รูปที่ 9	แสดงชุดทดลองและหัวฉีดที่มีการติดตั้งแผ่นกั้น (tabs)	8
รูปที่ 10	แสดงลักษณะหัวฉีด และชุดทดลองของ Colucci และ Viskanta	9
รูปที่ 11	แสดงลักษณะหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองของ Ashforth-Frost และ Jambunathan	9
รูปที่ 12	แสดงหัวฉีดสำหรับสร้าง Processing jet และลักษณะการไหลวนของลำเจ็ทในส่วนขยายหน้าตัด	10
รูปที่ 13	แสดงลักษณะหัวฉีดสำหรับสร้าง Processing jet แบบทางเข้า 1 รู และ 4 รู	11
รูปที่ 14	แสดงลักษณะของหัวฉีด และชุดทดลอง M.D. Limaye และคณะ	12
รูปที่ 15	แสดงลักษณะของหัวฉีดที่มีการปรับปรุงปากทางออกแบบจีบ (Lobes) และชุดทดลอง Martin และ Buchlin	13
รูปที่ 16	แสดงแบบจำลองของท่อเจ็ทจากท่อปกติ (ก) และเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ (ข)	15
รูปที่ 17	แสดงท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ ตามขนาดต่างๆ	16
รูปที่ 18	แสดงแบบจำลองของเจ็ทจากท่อที่ติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ	16
รูปที่ 19	แสดงท่อเจ็ทแบบปกติ และแบบปลอกท่อตามขนาดต่างๆ	17
รูปที่ 20	แสดงระบบพิกัดฉากที่ใช้ในการทดลอง	17
รูปที่ 21	แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว	19
รูปที่ 22	แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเจ็ทแบบติดปลอกท่อ	20
รูปที่ 23	แสดงตัวอย่างผลการหาค่าการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนด้วยโปรแกรม MATLAB	24
รูปที่ 24	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการกระจายความเร็ว	24
รูปที่ 25	แสดงอุปกรณ์หัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe)	25
รูปที่ 26	แสดงชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D Transverse system)	25

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเจ็ทและแรงดันไฟฟ้าจากการสอบเทียบหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน	26
รูปที่ 28	แสดงตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทตามแนวแกน Y	27
รูปที่ 29	แสดงตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทตามแนวแกน Z	28
รูปที่ 30	แสดงการกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้เคียง	31
รูปที่ 31	แสดงแบบจำลองของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ	32
รูปที่ 32	แสดงแบบจำลองของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ	33
รูปที่ 33	แสดงรายละเอียดของกริดภายในของแบบจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ	34
รูปที่ 34	แสดงรายละเอียดของกริดภายในของแบบจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ	34
รูปที่ 35	แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองการไหล	35
รูปที่ 36	แสดงการเปรียบเทียบความเร็วของเจ็ทพุ่งชนที่ปากทางออกเจ็ทต่อปกติระหว่างการทดลองกับการจำลองการไหลทางพลศาสตร์ของไหล (ที่ระยะพุ่งชน $H=8d$)	36
รูปที่ 37	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายนั้สเชิลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวศูนย์กลางท่อเจ็ทกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เงื่อนไข $H/d=6$, เจ็ทอากาศ, $Re=23,000$	37
รูปที่ 38	แสดงลักษณะการกระจายของนั้สเชิลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไข $L=2d$, เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	38
รูปที่ 39	แสดงลักษณะการกระจายนั้สเชิลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	39
รูปที่ 40	แสดงเส้นทางความเร็วของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจากการจำลองลักษณะการไหลเจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	40
รูปที่ 41	แสดงกระจายความเร็วเจ็ทในแนวแกนเจ็ทจากการจำลองลักษณะการไหลเจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	41
รูปที่ 42	แสดงกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนจากการจำลองลักษณะการไหลเจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	42
รูปที่ 43	แสดงลักษณะการกระจายของนั้สเชิลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	44
รูปที่ 44	แสดงลักษณะการกระจายของนั้สเชิลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	45

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 45	แสดงลักษณะการกระจายของน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	46
รูปที่ 46	แสดงลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	48
รูปที่ 47	แสดงลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	48
รูปที่ 48	แสดงลักษณะการกระจายน้ำสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	49
รูปที่ 49	แสดงบริเวณช่วงรัศมีที่ใช้ในการหาค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิว	50
รูปที่ 50	แสดงค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	51
รูปที่ 51	แสดงค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	52
รูปที่ 52	แสดงค่าน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	53
รูปที่ 53	แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้ง ปลอดภัยเทียบกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อกติ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	54
รูปที่ 54	แสดงเส้นทางการไหลเร็ว (Streamline) จากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว ที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	56
รูปที่ 55	แสดงเส้นทางการไหลเร็ว (Streamline) จากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว ที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	57
รูปที่ 56	แสดงเส้นทางการไหลเร็ว (Streamline) จากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว ที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	58
รูปที่ 57	แสดงแนวเส้นที่ตัดผ่านหน้าตัดเจ็ทสำหรับการกระจายความเร็วและการกระจายพลังงานความปั่นป่วน	59
รูปที่ 58	แสดงการกระจายความเร็วที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	60
รูปที่ 59	แสดงการกระจายพลังงานความปั่นป่วนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	61
รูปที่ 60	แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Y ที่ปากทางออกปลอดภัยตำแหน่ง $S/d=0$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	63
รูปที่ 61	แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Y ที่ปากทางออกปลอดภัยตำแหน่ง $S/d=2$ เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	64

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 62	แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Z เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$	65
รูปที่ 63	แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและ สมการทำนายค่าสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ย เจ็ทอากาศ, $10,000 \leq Re \leq 30,000$	67
รูปที่ 64	แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งความสัมพันธ์ของค่าสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ยกับ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เจ็ทอากาศ, $10,000 \leq Re \leq 30,000$	67

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์คำย่อ		หน่วย
A	คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน	m ²
B	คือ ความกว้างของหัวฉีดแบบสล็อต	m
c _p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	kJ/kg.K
CD _{ko}	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 นัสเซิลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)	-
Nu _L	คือ นัสเซิลท์นัมเบอร์ที่สูญเสียจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	-
\overline{Nu}	คือ นัสเซิลท์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน	-
P	คือ ความดันสถิต (Static pressure)	Pa
Pr	คือ แพลนด์นัมเบอร์ (Prandtl number)	-
\dot{Q}_{input}	คือ อัตราการเกิดความร้อนจากแหล่งจ่าย (Power supply)	W/m ²
\dot{Q}_{lost}	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสี	W/m ²
$\dot{Q}_{convection}$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ	W/m ²
$\dot{Q}_{radiation}$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน	W/m ²
r	คือ ระยะตามแนวรัศมีของท่อเจ็ท (Radius)	m
Ra _L	คือ เรย์ลีนัมเบอร์ (Rayleigh number)	-
Re	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

		หน่วย
สัญลักษณ์คำย่อ (ต่อ)		
S	คือ ระยะจากปากทางออกท่อขยายหน้าตัดถึงพื้นผิวพุ่งชน	m
T_j	คือ อุณหภูมิที่ปากทางออกเจ็ท	$^{\circ}\text{C}$
T_s	คือ อุณหภูมิภายในห้องทดลอง	$^{\circ}\text{C}$
T_{wh}	คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีการจ่ายพลังความร้อน	$^{\circ}\text{C}$
T_{wnh}	คือ อุณหภูมิเฉพาะจุดบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ไม่มีการจ่ายพลังความร้อน	$^{\circ}\text{C}$
\bar{T}_{wh}	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่มีการจ่ายพลังความร้อน	$^{\circ}\text{C}$
Tu	คือ ระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity)	-
U_i, U_j	คือ ส่วนประกอบของความเร็วเฉลี่ย	m/s
U_{τ}	คือ ความเร็วเฉือน (Shear velocity)	m/s
V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดจากแท่งทองแดงที่ซึ่ง	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
y	คือ ระยะห่างจากชั้นขีดผนัง	m
y^+	คือ ตัวแปรไร้มิติของระยะห่างชั้นขีดผนัง (Dimensionless wall distance)	-
สัญลักษณ์ตัวย่อ		
α	คือ ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)	$\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$
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 ค่าคงที่ของสเติเฟนและโบลซ์แมน (Stefan and boltzmann)	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
σ_k	คือ ค่าคงที่ความปั่นป่วนของแพลนทน์มเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน	-
σ_{ω}	คือ ค่าคงที่ความปั่นป่วนของแพลนทน์มเบอร์สำหรับอัตราการสลายเฉพาะ	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

		หน่วย
สัญลักษณ์ตัวย่อ (ต่อ)		
μ	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ (Dynamic viscosity)	kg/m.s
μ_t	คือ สมการความหนืดแบบปั่นป่วน (Turbulent viscosity)	kg/m.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)	-
P	คือ ความดัน (Pressure)	-
s	คือ ภาวะอากาศโดยรอบ (Surrounding)	-
st	คือ แผ่นสเตนเลส (Stainless foil)	-
t	คือ ความปั่นป่วน (Turbulent)	-
t	คือ เวลา (Time)	-
w	คือ ผนัง (Wall)	-
wh	คือ ผนังมีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน (Wall heat flux)	-
wnh	คือ ผนังไม่มีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน (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)	-
•	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง (Rate)	-

รายการผลงานที่ตีพิมพ์และประชุมวิชาการ

(1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ณัฐพร แก้วชูทอง, มั๊กตาร์ แวหะयी, ภาสกร เวสสะโกศล และ ชยุต นันทดุสิต 2557 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10, 4-6 มิถุนายน 2557, ม.สงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

(2) บทความวิชาการ (Journal paper)

Kaewchoothong, N., Wae-hayee, M., Vessakosol, P., Niyomvas B. and Nuntadusit, C., (2014), "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Expansion Pipe Nozzle with Air Entrainment Holes", Advanced Materials Research, Vol. 932-931, pp. 1213-1217. (The 5th KKU International Engineering Conference 2014 (KKU-IENC 2014), March 27-29, Khon Kaen, Thailand)

(3) สิทธิบัตร (Patent)

ณัฐพร แก้วชูทอง, มั๊กตาร์ แวหะयी และ ชยุต นันทดุสิต, ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก, สิทธิบัตรไทย (Thai patent), (กำลังยื่นขอ)

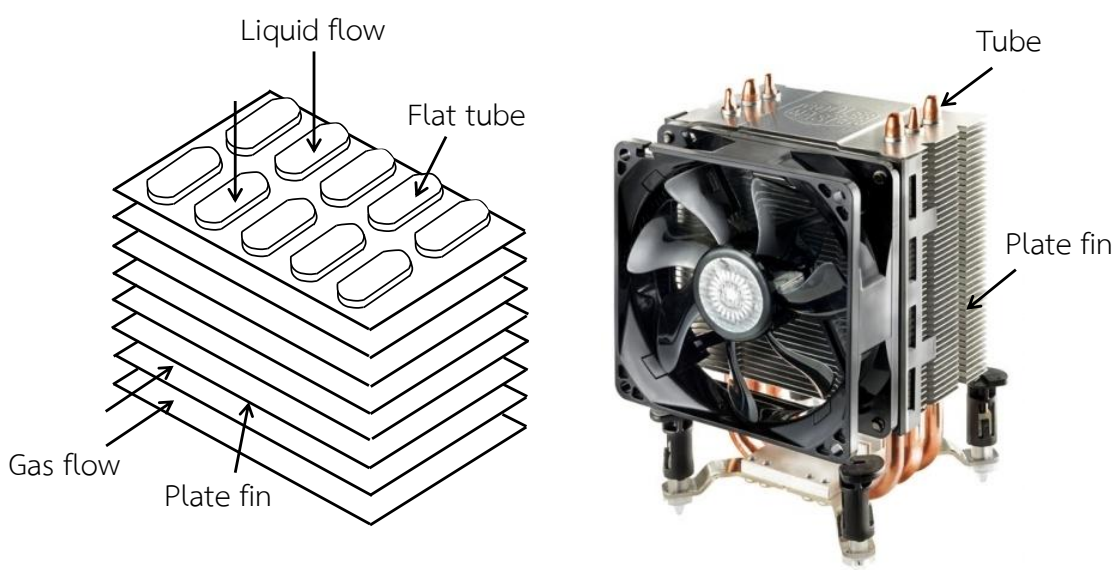
1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ โดยเฉพาะในกระบวนการที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การให้ความร้อน (Heating) การระบายความร้อน (Cooling) การทำให้แห้งบนพื้นผิว (Drying surface) ซึ่งกระบวนการส่วนใหญ่จะใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนนั้นยังขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับของไหล มีพื้นที่ผิวมากส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มขึ้น เช่น การติดตั้งชุดระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

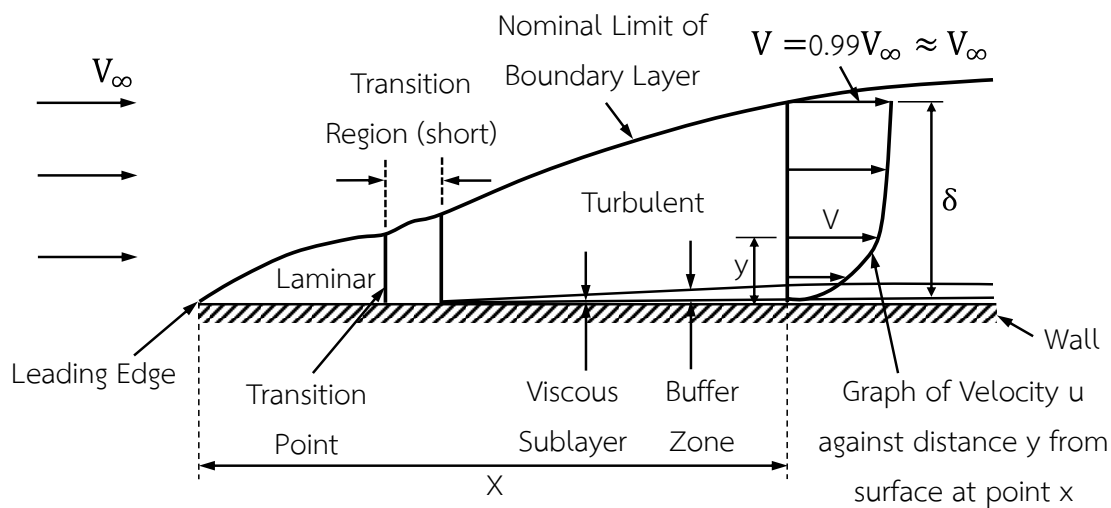
กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสถานะของไอที่ออกมาจากหม้อต้มให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันกับ อุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอื่นๆ ก็ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่ มีข้อดีคือ สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อน การส่งผ่านความร้อนได้ดี

โดยทั่วไปหากต้องการเพิ่มอัตราการพาความร้อน สามารถทำได้สองวิธีคือ วิธีการเพิ่มพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ทำได้โดยการเพิ่มพื้นผิวที่สัมผัสกับของไหล เช่น การติดครีบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1 แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีข้อเสียคือ สิ้นเปลืองวัสดุ อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมาก หากกรณีที่เป็นการไหลในช่องทางปิดก็จะเกิดการสูญเสียความดันในระบบ เนื่องจากตัวครีบบจะเป็นตัวต้านการไหล ทำให้ต้องเพิ่มกำลังของปั๊มหรือพัดลมในระบบให้มากขึ้น



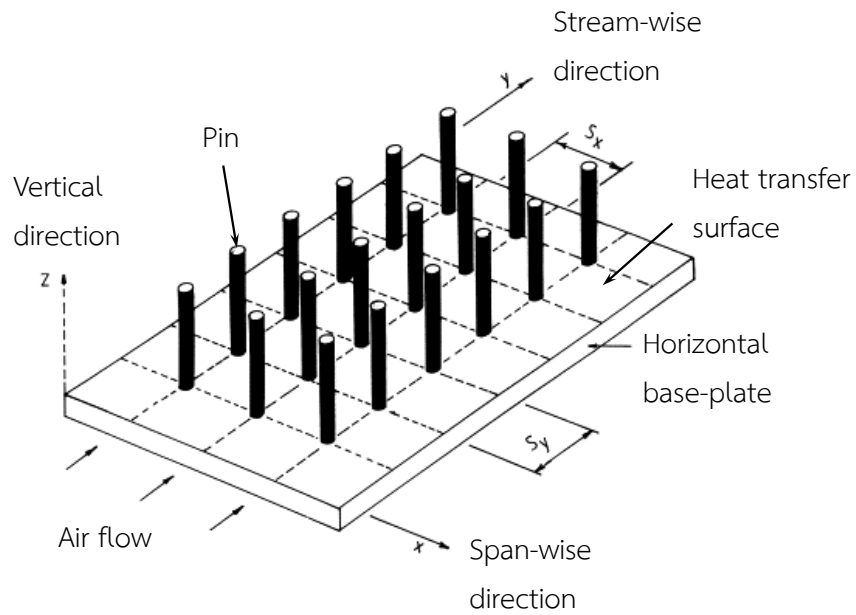
รูปที่ 1 แสดงการติดครีบบ (Fin) ลงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน [1]

วิธีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ในกรณีที่ของไหลไหลผ่านพื้นผิวที่อยู่นิ่งกับที่ ความหนืด (Viscosity) ของไหลจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างต่อเนื่องโดยบริเวณที่ใกล้กับพื้นผิวจะมีความเร็วต่ำ และที่ตำแหน่งห่างจากพื้นผิวความเร็วของของไหลจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ จนถึงบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ จะเรียกชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้ว่า “ชั้นขอบเขต” (Boundary layer) ดังแสดงในรูปที่ 2 ด้วยเหตุที่ภายในชั้นขอบเขตของไหลจะมีความเร็วต่ำ เป็นผลทำให้ภายในชั้นขอบเขตมีการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดี เปรียบเสมือนภายในชั้นขอบเขตเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถทำได้โดยการลดความหนาของชั้นขอบเขต โดยการเพิ่มความเร็วให้กับของไหล แต่อย่างไรก็ตาม จากการที่ต้องเพิ่มความเร็วของของไหลจะเกิดผลเสียที่ตามมาคือ ต้องเพิ่มกำลังของปั๊มหรือพัดลมให้กับระบบ ทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

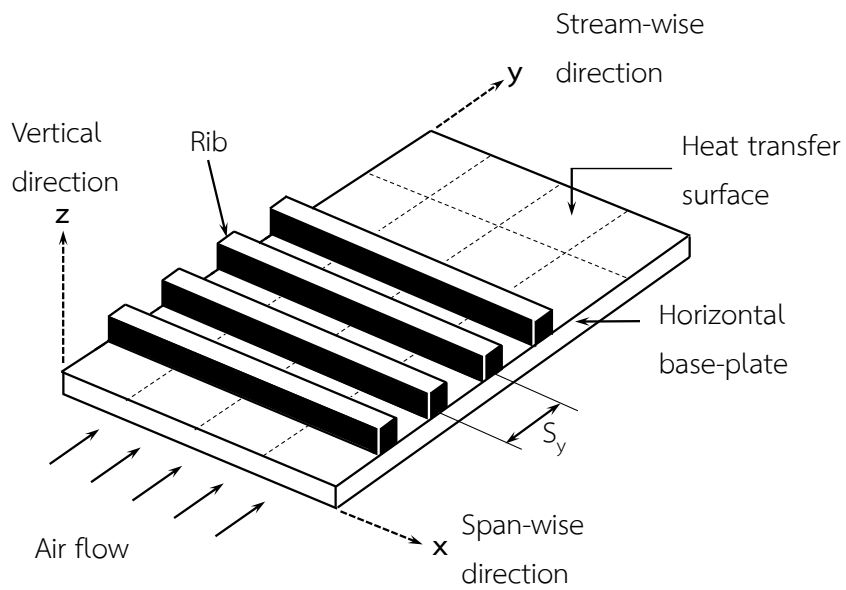


รูปที่ 2 แสดงชั้นขอบเขตการไหลบนพื้นผิว

การเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถทำได้อีกวิธีคือ การทำลายชั้นขอบเขตที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลกับพื้นผิว ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulator) เช่น การติดตั้งกลุ่มของพิน (Pin) การติดตั้งกลุ่มของครีบ (Rib) บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับพื้นผิวได้ เนื่องจากการไหลจะเกิดกระแสหมุนวนเมื่อผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน ทำให้ชั้นขอบเขตการไหลถูกทำลาย แต่อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวจำเป็นต้องคำนึงถึงการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น



(ก) สร้างความปั่นป่วนด้วยพิน (Pin)



(ข) สร้างความปั่นป่วนด้วยครีบริบ (Rib)

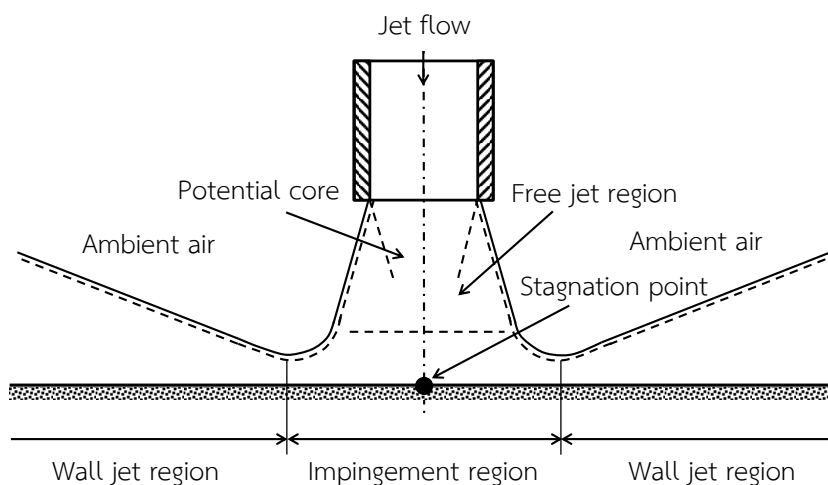
รูปที่ 3 แสดงลักษณะการไหลผ่านอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน (Turbulator)

การใช้เจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (Impinging jet) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ของไหลจากหัวฉีด (Nozzle) ที่มีความเร็วสูงกว่าของไหลในบริเวณรอบๆ ไหลพุ่งชนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 4 วิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้ความร้อนหรือระบายความร้อนแบบรวดเร็วบนพื้นผิว อีกทั้งยังมีจุดเด่นคือให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าวิธีอื่นๆ เมื่อเทียบอัตราการไหลของของไหลที่ใช้เท่ากัน จึงสามารถช่วยประหยัดพลังงานของปั๊มหรือพัดลมได้ ซึ่งโครงสร้างของเจ็ทมีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเป็นอย่างมาก สำหรับโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนประกอบด้วยดังต่อไปนี้

บริเวณเจ็ทอิสระ (Free jet region) คือ ลำของไหลที่มีความเร็วพุ่งออกจากหัวฉีดสู่ของไหลที่อยู่รอบๆ โดยที่บริเวณแกนกลางของเจ็ทจะมีความเร็วสูงสุด และความเร็วของเจ็ทจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวแกนรัศมีของหน้าตัดเจ็ท โครงสร้างของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ บริเวณโพเทนเชียลคอร์ (Potential core zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มออกจากหัวฉีด มีความเร็วของเจ็ทคงที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด หลังจากที่เจ็ทพุ่งออกจากหัวฉีด เนื่องจากแรงหนืดที่เกิดจากผลต่างของความเร็วระหว่างเจ็ทกับของไหลที่หยุดนิ่งอยู่รอบๆ ทำให้บริเวณส่วนของบริเวณโพเทนเชียลคอร์ของเจ็ทมีขนาดเล็กลง และของไหลบริเวณรอบๆ เจ็ทถูกดูดให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น หน้าตัดของเจ็ทจึงขยายตัวกว้างขึ้นตามระยะที่ห่างจากปากทางออก บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหน้าตัดเจ็ทจากบริเวณโพเทนเชียลคอร์จนถึงบริเวณที่ของไหลหยุดนิ่งอยู่กับที่เรียกว่า “ความหนาของชั้นเฉือน (Shear layer)” ยิ่งห่างจากปากทางออกหัวฉีด ความหนาของชั้นเฉือนจะเพิ่มขึ้น และบริเวณโพเทนเชียลคอร์จะลดลง ส่วนที่สองคือ บริเวณการไหลกำลังพัฒนาตัว (Developing zone) เป็นช่วงที่บริเวณโพเทนเชียลคอร์หมดไป มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วภายในลำเจ็ท โดยความเร็วภายในลำเจ็ทจะค่อยๆ ลดลง และมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนวแกนรัศมี ค่าความแปรปรวน (Turbulent intensity) ที่แกนของเจ็ท จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้ และส่วนที่สามคือ บริเวณการไหลพัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed zone) เป็นบริเวณต่อจากบริเวณการไหลกำลังพัฒนาตัวของลำเจ็ทที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในลำเจ็ทอย่างสมบูรณ์แล้ว และในบริเวณนี้โมเมนตัมของลำเจ็ทจะยิ่งลดลงเมื่อห่างออกมาจากหัวฉีดมากขึ้น

บริเวณเจ็ทพุ่งชน (Impingement region) คือ บริเวณที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวโดยตรง ก่อนเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวความเร็วของเจ็ทจะเริ่มลดลง และมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเจ็ทพุ่งชน หรือบริเวณหยุดนิ่ง (Stagnation point) บนพื้นผิว หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนผนังที่ถูกชนรอบบริเวณหยุดนิ่ง ภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของของไหลรอบบริเวณหยุดนิ่งบนผนัง เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเจ็ทกะทันหันหลังจากการชน

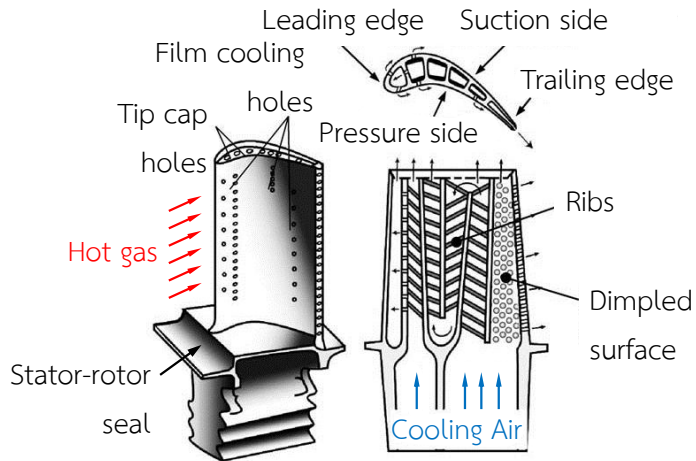
บริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet region) คือ การไหลรอบๆ บริเวณหยุดนิ่ง บนผนัง หลังจากที่เจ็ทพุ่งชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทของไหลจะเริ่มลดลง และชั้นขอบเขต (boundary layer) การไหลบนผนังจะค่อยๆ หนาขึ้น



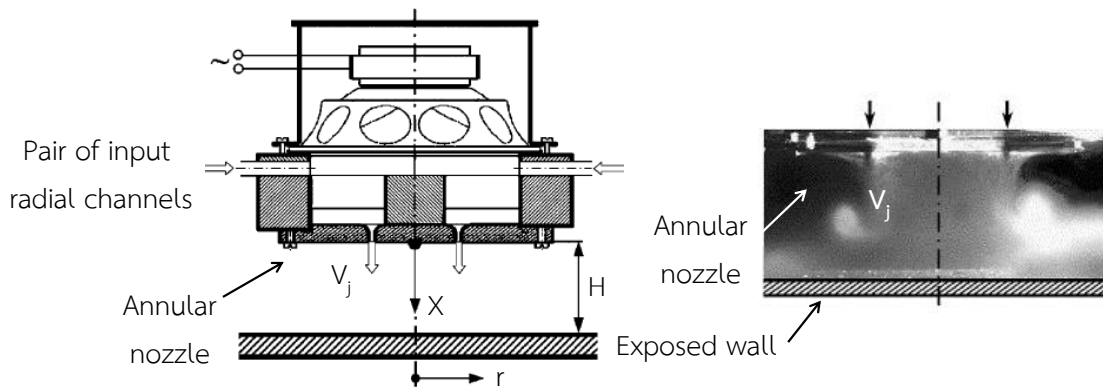
รูปที่ 4 แสดงวิธีการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน

ปัจจุบันงานทางด้านวิศวกรรมจำนวนมากต้องการเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การระบายความร้อนใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ และกระบวนการตัดโลหะ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นการระบายความร้อนภายในใบพัดเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบโดยใช้เจ็ทพุ่งชน หากสามารถเพิ่มความสามารถการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทได้แล้ว จะสามารถลดอัตราการไหลของเจ็ทได้ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ในปั๊มหรือพัดลมได้ นอกจากนี้ มีผลทำให้การให้ความร้อนหรือการระบายความร้อนบนพื้นผิวเกิดรวดเร็วขึ้น ลดเวลาของกระบวนการ และลดขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลง หากมีการพัฒนาให้อุปกรณ์ด้านความร้อนมีประสิทธิภาพสูงจะสามารถช่วยลดต้นทุนการใช้พลังงานได้อย่างมาก

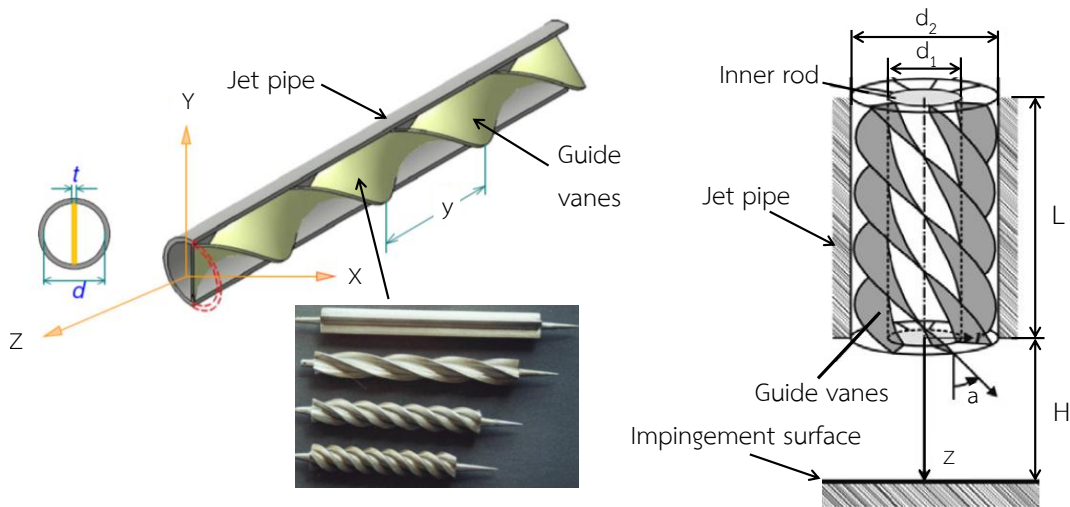
การควบคุมการไหลเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทนั้น โดยทั่วไปแบ่งได้ 2 วิธี วิธีแรกคือ การควบคุมการไหลแบบกระตุ้น (Active control) เป็นการควบคุมการไหลโดยอาศัยพลังงานจากภายนอกในการควบคุมการไหลของเจ็ท เช่น การใช้ลำโพงสร้างพลังงานเสียงในการกระตุ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 หรืออาจใช้ตัวกระตุ้น (Actuator) แบบต่างๆ ให้ทำงานเคลื่อนไหวสร้างการไหลของเจ็ทให้เป็นแบบสั่นได้ เช่น การหมุนของวาล์ว การเคลื่อนที่ของลูกสูบ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์การเคลื่อนไหวของอุปกรณ์เหล่านี้ มีข้อเสียคือ จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาที่ดี และมีข้อจำกัดด้านความทนทาน ไม่สามารถใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิสูงได้ เช่น เตาเผาเตาอบ เป็นต้น ส่วนวิธีที่สองคือ การควบคุมการไหลแบบไม่มีตัวกระตุ้น (Passive control) เป็นการควบคุมการไหลแบบไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว แต่จะใช้อุปกรณ์บางอย่างที่ติดตั้งเพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของของไหล เช่น การใส่แผ่นปิดในท่อเพื่อเพิ่มการไหลหมุนวนตามแนวแกนของเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 7 หรือการใช้เจ็ทที่มีปากทางออกแบบหน้าตัดไม่กลม (Non-circular jet) มีข้อดีคือ ไม่มีอุปกรณ์ควบคุมที่ซับซ้อน ราคาถูก สามารถใช้งานได้ง่ายในอุตสาหกรรม



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการระบายความร้อนใบพัดของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ [2]



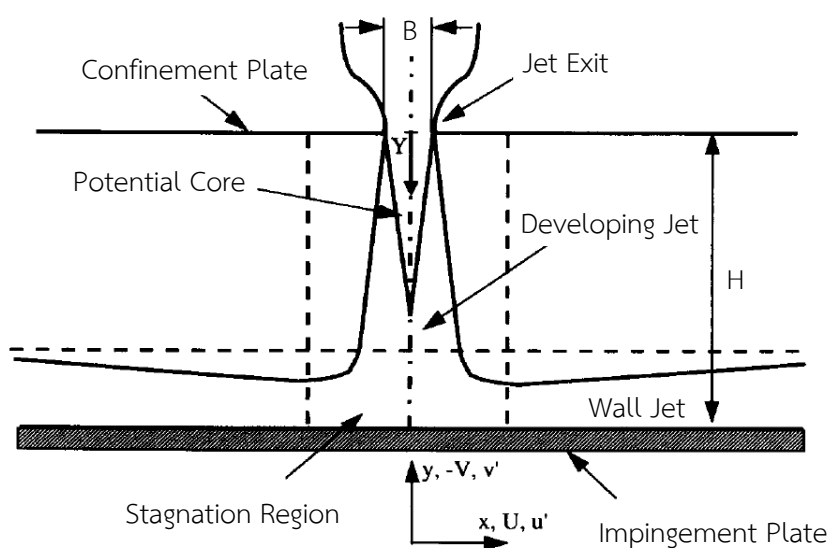
รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลแบบกระตุ้น (Active control) [3]



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการควบคุมการไหลแบบไม่มีการกระตุ้น (Passive control) [4]

1.2 ทบทวนบทความที่เกี่ยวข้อง

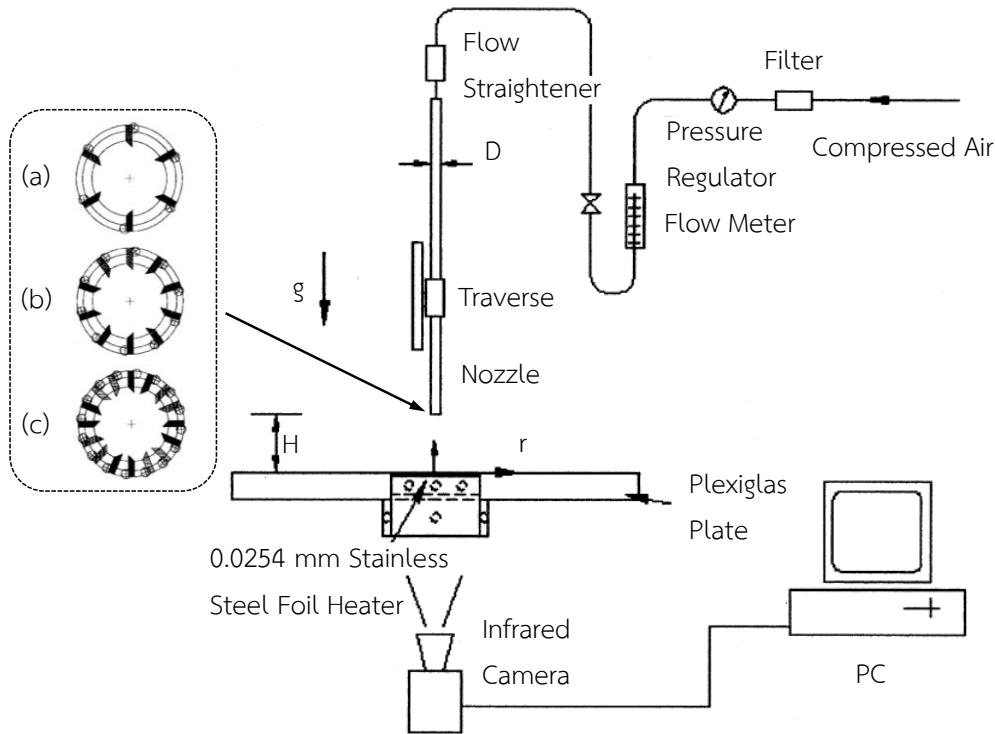
Ashforth-Frost และคณะ [5] ได้ศึกษาโครงสร้างการไหลของเจ็ทจากหัวฉีดแบบสลีต (Impinging slot jet) ที่พุ่งชนพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยทำการวัดความเร็วเฉลี่ย และระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity, Tu) ตามแนวแกนของเจ็ท และหน้าตัดของเจ็ท ที่ $Re=20,000$ จากการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจะสอดคล้องกับความเร็ว และความปั่นป่วนของเจ็ทที่วัดได้ กล่าวคือในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4B$ (เมื่อ B คือความกว้างของหัวฉีดแบบสลีต) ซึ่งเป็นระยะที่ส่วนโพเทินเซียลคอร์ของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว พบว่า มีระดับความปั่นป่วนจุดที่เจ็ทพุ่งชนบนผนังมีค่าน้อย และเกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง (Secondary peak) บริเวณผนังตามแนวรัศมีของเจ็ท (Wall jet) ที่ระยะ $r/B=7.5$ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนบนพื้นผิว ในกรณีที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=9.2B$ เป็นระยะที่บริเวณโพเทินเซียลคอร์ของเจ็ทหมดลง ทำให้ระดับความปั่นป่วนในลำเจ็ทสูงขึ้น และเปลี่ยนเป็นการไหลแบบปั่นป่วนก่อนที่เจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนจะสูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเท่านั้น ส่วนบริเวณผนังตามแนวรัศมีของเจ็ท ไม่เกิดปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง



รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของเจ็ทแบบสลีตที่ใช้ในการทดลองของ Ashforth-Frost และคณะ [5]

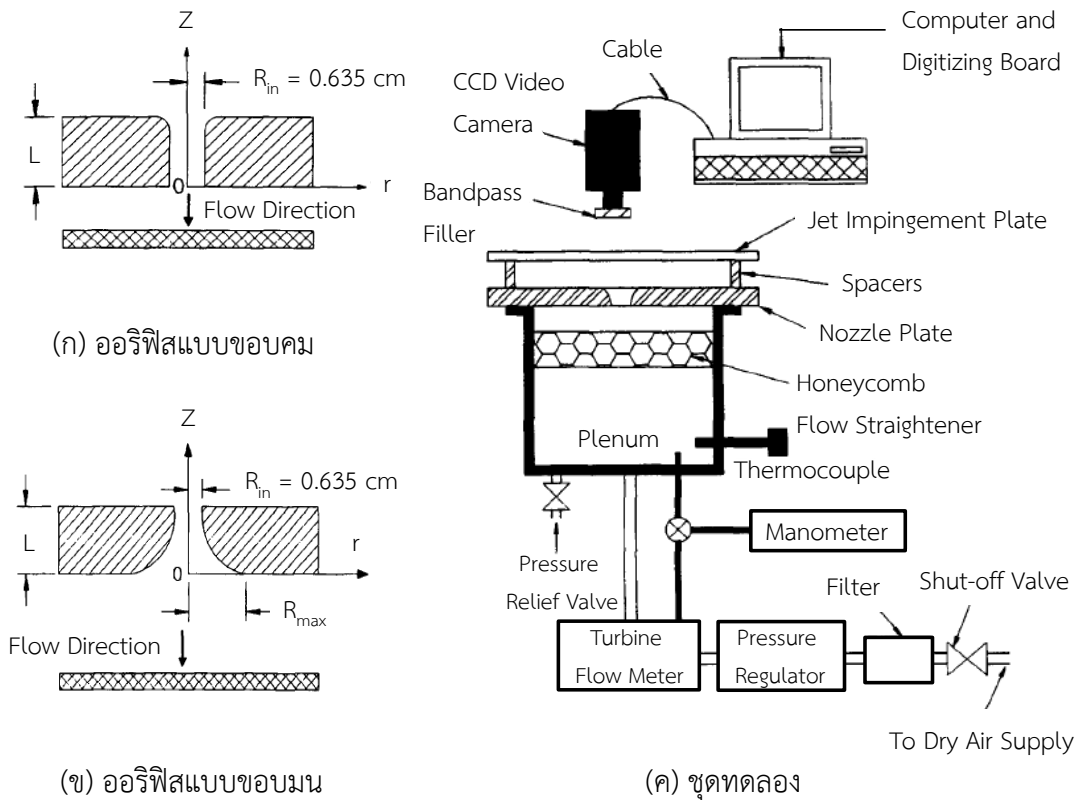
Gao และคณะ [6] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่ $Re=23,000$ โดยติดตั้งแผ่นกั้น (tabs) สามเหลี่ยมที่ปากทางออกเจ็ทสามแบบ ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยแต่ละแบบแตกต่างกันที่จำนวนแผ่นกั้น 6, 10, และ 16 แผ่น ตามลำดับ ในการทดลองได้ปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนให้อยู่ในช่วง $H=2d-10d$ โดยที่ d คือขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท นอกจากนี้ ได้ปรับระยะยื่นของปลายแผ่นกั้นถึงพื้นผิวด้านในของท่อเจ็ท (Protruding distance, P) ให้อยู่ในช่วง $P=0.06d-0.15d$ สำหรับมุม และระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น กำหนดให้มีค่าเท่ากัน ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งแผ่นกั้นมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อน

พื้นผิวสูงขึ้น โดยที่จำนวนแผ่นกัน 16 แผ่น ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด สำหรับผลของระยะยื่นของปลายแผ่นกันถึงพื้นผิวด้านในท่อเจ็ทในกรณีทีระยะ $P=0.15d$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ระยะ $P=0.1d$



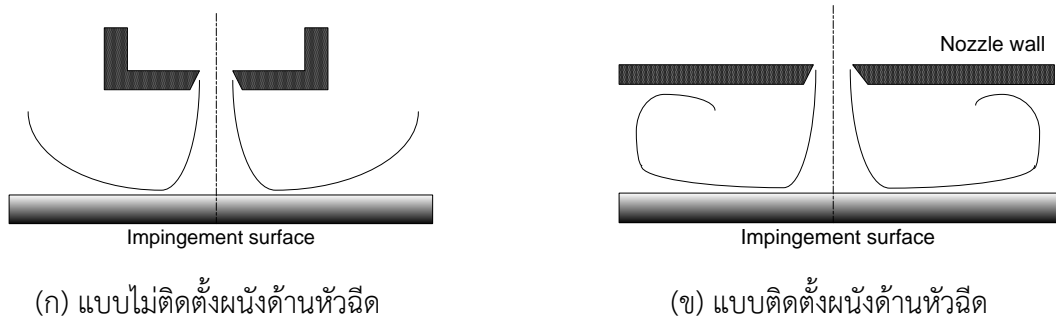
รูปที่ 9 แสดงชุดทดลองและหัวฉีดที่มีการติดตั้งแผ่นกัน (tabs) [6]

Colucci และ Viskanta [7] ได้ศึกษาผลของลักษณะปากทางออกของหัวฉีดที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ในช่วง $10,000 \leq Re \leq 50,000$ และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วง $0.25 < H/d < 6.0$ โดยศึกษาผลของลักษณะออริฟิสแบบขอบคม (รูปที่ 10(ก)) และออริฟิสแบบขอบมน (รูปที่ 10(ข)) จากการศึกษาพบว่าที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน H/d (เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิส) ลักษณะปากทางออกของออริฟิสจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวอย่างมาก โดยที่ออริฟิสแบบขอบมนจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าออริฟิสแบบขอบคม โดยเฉพาะที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูง $Re \geq 30,000$ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H/d) ต่ำ บริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบนพื้นผิวเกิดขึ้นสองบริเวณ โดยบริเวณแรกเกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ($r/d=0$) และบริเวณที่สองเกิดขึ้นตามแนวรัศมีที่อยู่ในช่วง $1 \leq r/d \leq 2$ ห่างจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน โดยที่ตำแหน่งของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอันดับที่สอง จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของหัวฉีด และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ท



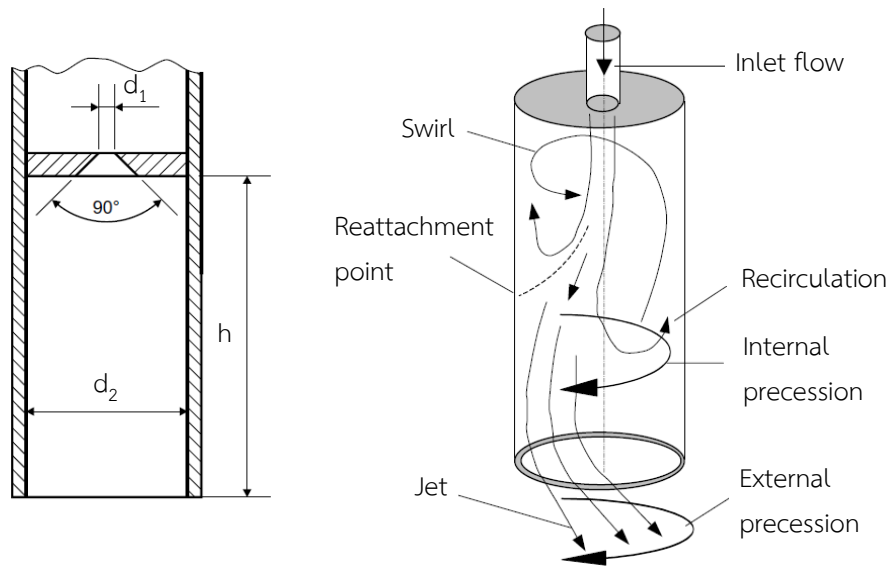
รูปที่ 10 แสดงลักษณะหัวฉีด และชุดทดลองของ Colucci และ Viskanta [7]

Ashforth-Frost และ Jambunathan [8] ได้ศึกษาผลกระทบจากลักษณะของหัวฉีด การจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่ $Re=22,500$ ในการทดลองได้เลือกใช้หัวฉีด 2 กรณีคือ กรณีแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด (รูปที่ 11(ข)) และกรณีที่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด (รูปที่ 11(ก)) จากผลการทดลองพบว่า การติดตั้งผนังด้านหัวฉีดมีผลทำให้บริเวณโพ텐เชียลคอร์ยาวกว่าแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีดประมาณ 20% และในกรณีที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวพบว่า การติดตั้งผนังด้านหัวฉีดทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวลดลง เมื่อเทียบกับแบบไม่ติดตั้งผนังด้านหัวฉีด ซึ่งเป็นผลจากการที่เจ็ทถูกจำกัดบริเวณการไหลหลังจากที่พุ่งชนผนัง



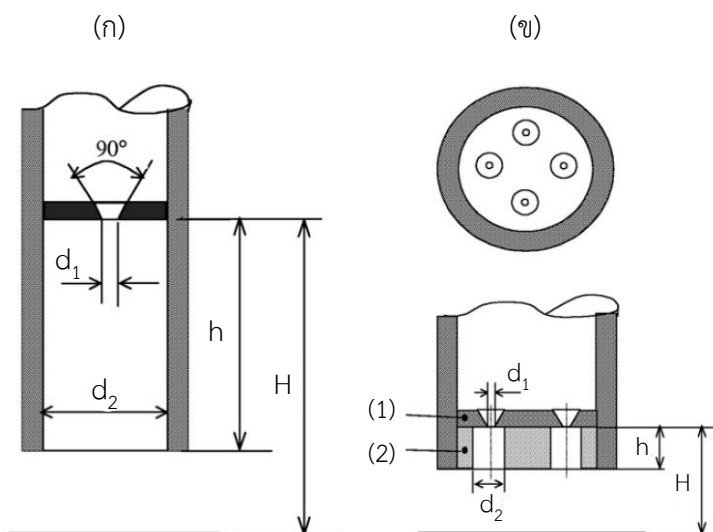
รูปที่ 11 แสดงลักษณะหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองของ Ashforth-Frost และ Jambunathan [8]

Goppert และคณะ [9] ได้ศึกษาการไหลแบบไม่คงตัวของเจ็ทจากหัวฉีดที่มีลักษณะเป็นท่อขยายหน้าตัด (Expansion pipe) ที่ $Re=25,000$ ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งการไหลของเจ็ทจะมีลักษณะหมุนรอบแกนเจ็ทภายในท่อส่วนขยาย จึงถูกเรียกว่าเป็น Processing jet เกิดจากปรากฏการณ์ Coanda ซึ่งเจ็ทจะพยายามไหลติดกับผนัง และเมื่อมีผนังอยู่รอบๆ ในส่วนของท่อขยายทำให้เจ็ทเคลื่อนที่หมุนติดผนังด้านในของท่อส่วนขยายไปมา ในการทดลองได้ใช้หัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe) สำหรับวัดความเร็วเฉลี่ย ระดับความปั่นป่วน และความถี่ของการไหลพบว่า ทั้งขนาดและรูปร่างของหัวฉีด มีผลต่อลักษณะการไหล โดยเฉพาะความถี่ของเจ็ท นอกจากนี้ ได้วัดการถ่ายเทความร้อนพื้นผิวเพื่อเปรียบเทียบกับกรณีของเจ็ทแบบท่อปกติ ที่ไหลแบบต่อเนื่อง พบว่า Processing jet ไม่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ เนื่องจากมีการผสมกับอากาศที่อยู่รอบๆ มากเกินไป เมื่อเทียบกับเจ็ทแบบท่อปกติ และอาจเกิดจากความถี่ของการไหลของเจ็ทที่มากหรือน้อยเกินไป ทำให้ยังไม่สามารถสรุปหาเงื่อนไขที่เหมาะสมได้



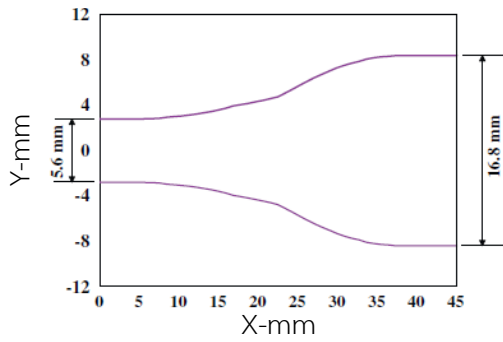
รูปที่ 12 แสดงหัวฉีดสำหรับสร้าง Processing jet และลักษณะการไหลวนของลำเจ็ทในท่อส่วนขยายหน้าตัด [9]

Zhou และคณะ [10] ได้ทดลองโดยใช้รูปร่างของหัวฉีดคล้ายกับของ Goppert และคณะ ดังแสดงในรูปที่ 13(ก) โดยได้ศึกษาผลของขนาดทางออก $d_1=3.5$ mm, 1.75 mm และ 0.8 mm (โดยที่ $d_2/d_1=10$ และ $h/d_1=20$) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ากรณีของ Goppert และคณะ [9] นอกจากนี้ ได้ทดลองเพิ่มกรณีที่เพิ่มจำนวนหัวฉีดเป็น 4 รู แต่ละรูมีขนาด $d_1=0.8$ mm ดังแสดงในรูปที่ 13(ข) จากผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H/d_1=25$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ในขณะที่การลดขนาดของทางเข้า d_1 ไม่สามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้เมื่อเทียบกับเจ็ทแบบท่อปกติ

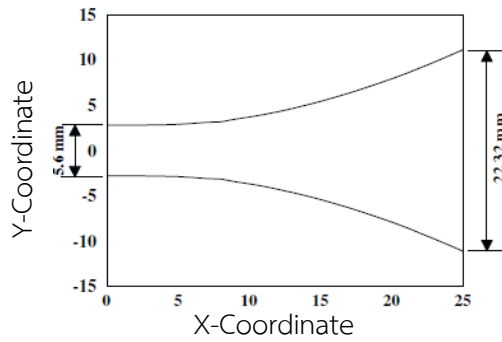


รูปที่ 13 แสดงลักษณะหัวฉีดสำหรับสร้าง Processing jet แบบทางเข้า 1 รู และ 4 รู [10]

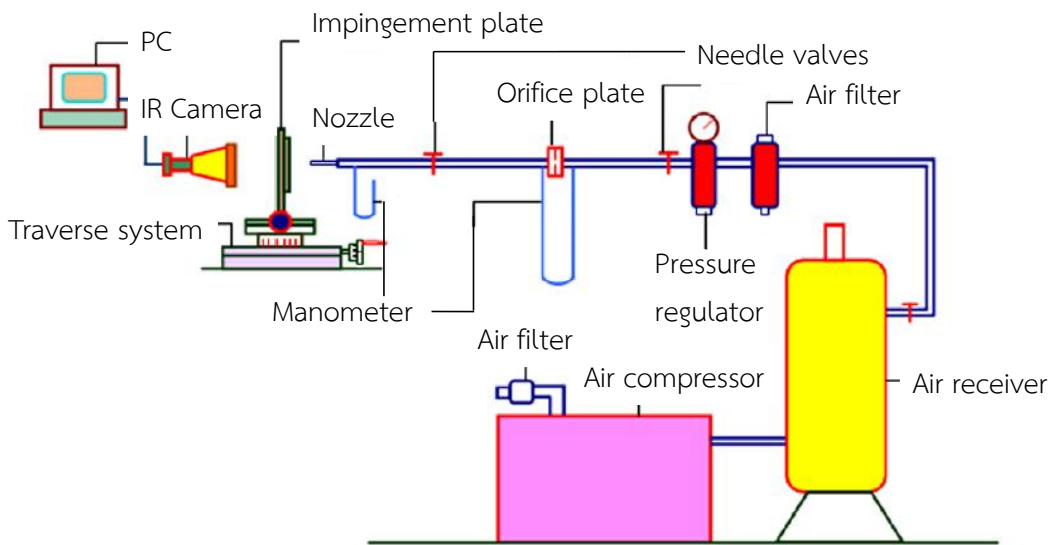
M.D. Limaye และคณะ [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับหัวฉีดพุ่งชนพื้นผิวเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยมีหัวฉีดสองแบบคือ แบบ Gibbings (รูปที่ 14(ก)) ทดลองที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=112,400, 144,400, 174,000, 199,000$ และ $232,000$ และแบบ Smith and Wang (รูปที่ 14(ข)) ทดลองที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=108,000, 140,000, 171,000, 206,000$ และ $228,400$ โดยหัวฉีดทั้งสองแบบมีเส้นผ่านศูนย์กลางตรงปากทางออกเท่ากันคือ $d=5.08$ mm ในการทดลองนี้ได้มีการวัดอัตราส่วนความดันรวมในหัวฉีดต่อความดันบรรยากาศ (P_0/P_∞) เท่ากับ 2.36, 3.04, 3.72, 4.4 และ 5.08 ตามลำดับ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H/d=1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12$ และ 15 พื้นผิวพุ่งชนทำด้วยแผ่นสแตนเลสบาง แล้ววัดด้วยกล้องอินฟราเรด (Infrared Camera) จากการทดลองพบว่า หัวฉีดแบบ Gibbings nozzle ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H/d < 4$ จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีกว่าหัวฉีดแบบ Smith and Wang nozzle แต่ในทางกลับกันถ้าระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น $H/d > 6$ หัวฉีดแบบ Smith and Wang nozzle จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าหัวฉีดแบบ Gibbings nozzle โดยภาพรวมรวมค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยทั้งหมดของหัวฉีดแบบ Smith and Wang nozzle จะมากกว่าหัวฉีดแบบ Gibbings nozzle ประมาณ 40% ซึ่งทั้งคู่แปรตามอัตราส่วนความดัน (P_0/P_∞) กล่าวคือ ยังมีค่าอัตราส่วนความดันสูงจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนสูงหรือมีการระบายความร้อนได้ดี



(ก) หัวฉีดแบบ Gibbins



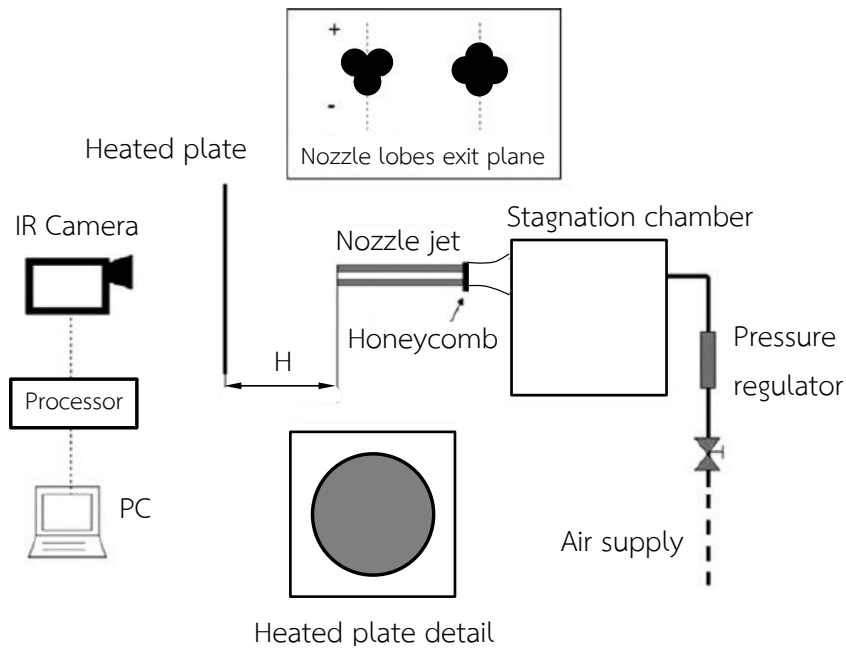
(ข) หัวฉีดแบบ Smith and Wang



(ค) ชุดทดลอง M.D. Limaye และคณะ

รูปที่ 14 แสดงลักษณะของหัวฉีดและชุดทดลอง M.D. Limaye และคณะ [11]

Martin และ Buchlin [12] ได้ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยมีการปรับปรุงตรงปากทางออกของท่อเจ็ทเป็นแบบจีบ (Lobe) 3 และ 4 แฉก ดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งมีความสมมาตรกันทั้งสองข้าง การทดลองมีการปรับระยะที่ปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H/d = 1, 3, 4, 5, 6,$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $Re=15,000$ ในการทดลองพบว่า ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H/d \leq 1$ การปรับปรุงตรงปากทางออกของท่อเจ็ทเป็นแบบจีบ 3 แฉก ให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่ากรณีแบบจีบ 4 แฉก แต่ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H/d \geq 7$ การปรับปรุงตรงปากทางออกของท่อเจ็ทเป็นแบบจีบ 4 แฉก จะให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่ากรณีแบบจีบ 3 แฉก



รูปที่ 15 แสดงลักษณะของหัวฉีดที่มีการปรับปรุงปากทางออกแบบจีบ (Lobes) และชุดทดลอง Martin และ Buchlin [12]

จากการค้นคว้างานวิจัยข้างต้นเกี่ยวกับการใช้เจ็ทพุ่งชนที่มีการปรับปรุงปากทางออกเจ็ท ในการระบายความร้อนหรือให้ความร้อนพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนรวมถึงบริเวณตามแนวรัศมีของเจ็ทเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับเจ็ทแบบไม่ปรับปรุงที่ปากทางออกเจ็ท (แบบท่อกปกติ) เนื่องจากการปรับปรุงที่ปากทางออกเจ็ทจะช่วยเพิ่มการผสมระหว่างของไหลที่ออกจากเจ็ทและของไหลรอบๆ เจ็ท ทำให้เจ็ทมีระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) และการกระจายความเร็วในลำเจ็ทสูงเมื่อเทียบกับเจ็ทแบบไม่ปรับปรุงที่ปากทางออกเจ็ท ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำเจ็ทพุ่งชนที่มีการปรับปรุงปากทางออกเจ็ท โดยติดตั้งท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ และติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศมา ซึ่งอาจจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูง และสม่ำเสมอขึ้น เนื่องจากการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาผสมกันระหว่างลำเจ็ทที่พุ่งออกจากหัวฉีดและของไหลที่อยู่โดยรอบของลำเจ็ทมากขึ้น ส่งผลทำให้มีความเร็วและความปั่นป่วนเพิ่มสูงขึ้น

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

(1) ได้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหล ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และได้แนวทางในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

(2) สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบระบบระบายความร้อน ระบบให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้ โดยการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน และความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เช่น การระบายความร้อนแผ่นโลหะในโรงงานอุตสาหกรรม การระบายความร้อนของใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ การระบายความร้อนในชุดอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบหัวฉีดผสมสารเคมี หรือออกแบบหัวเผาที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของรูปร่างท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ (Expansion pipe) และปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ (Sleeve pipe) ที่มีต่อการไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

2.2 ขอบเขตของงานวิจัย

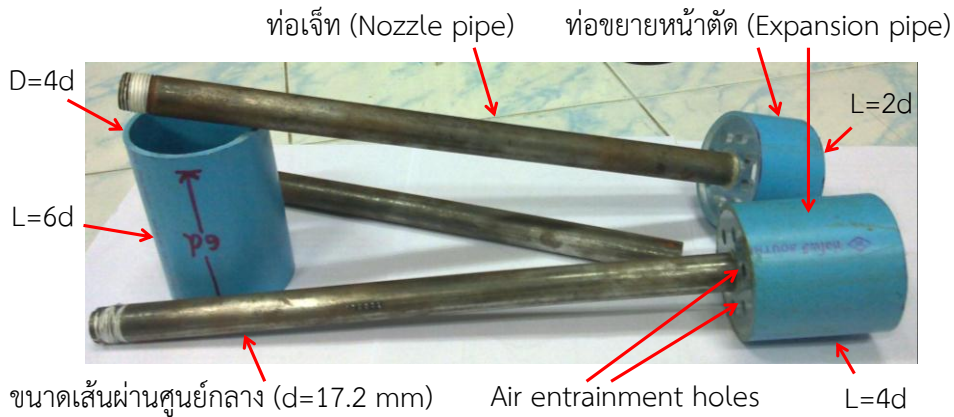
(1) ศึกษาการไหลของเจ็ทจากท่อกลมพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว กรณีที่มีการปรับปรุงปากทางออกเจ็ทแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ และกรณีที่มีการปรับปรุงปากทางออกเจ็ทแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ เทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

(2) ศึกษาการไหลของเจ็ทที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ $Re=20,000$ สำหรับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ และศึกษาที่ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของเจ็ท $Re=10,000, 15,000, 20,000, 25,000$ และ $30,000$ สำหรับเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

(3) ศึกษาลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ANSYS version 13.0 (Fluent)

(4) ศึกษาการไหลโดยการวัดการกระจายความเร็ว และการกระจายความปั่นป่วน ด้วย Hot-wire anemometer

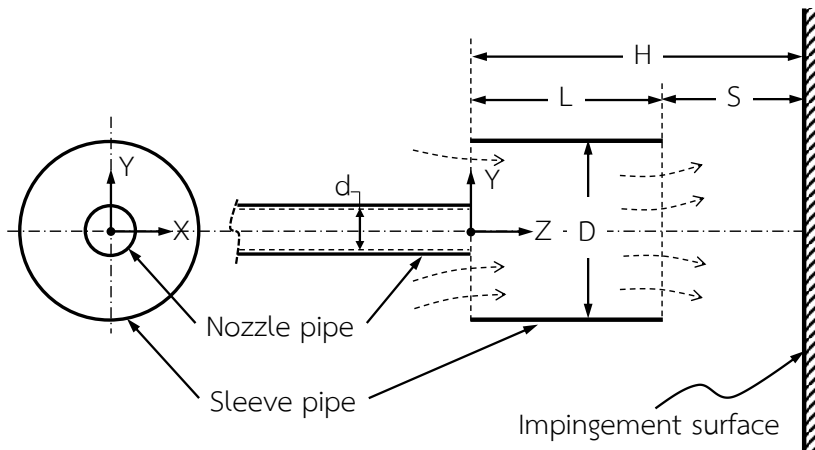
(5) ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนโดยใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared camera)



รูปที่ 17 แสดงท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ ตามขนาดต่างๆ

3.1.2 แบบจำลองของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

รูปที่ 18 แสดงแบบจำลองของเจ็ทพุ่งชนจากหัวฉีดแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ (Sleeve pipe) ท่อเหนี่ยวนำอากาศเป็นแบบหน้าตัดกลม สามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y และ Z ซึ่งถูกจับยึดด้วยชุดควบคุมตามแนวแกน (2D Transverse controller) ในการทดลองจะปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d, 6d$ และปรับความยาวของปลอกท่อ $L=2d, 4d$ และ $6d$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 19 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกรณีท่อเจ็ทแบบปกติ โดยกำหนดพิกัดแกนอ้างอิงเหมือนกันกับกรณีเจ็ทท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 16



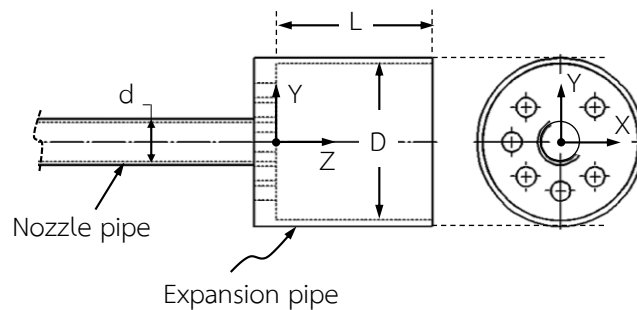
รูปที่ 18 แสดงแบบจำลองของเจ็ทจากท่อที่ติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ



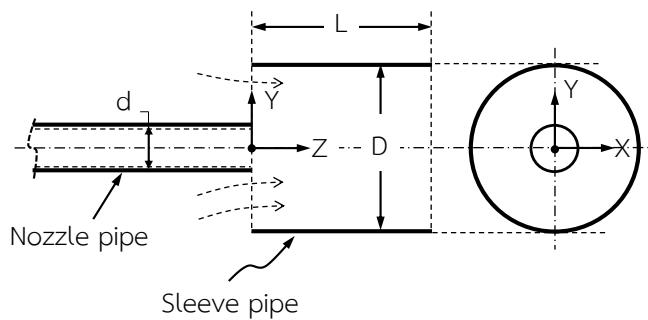
รูปที่ 19 แสดงท่อเจ็ทแบบปกติ และแบบปลอกท่อตามขนาดต่างๆ

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้กำหนดระบบแกน (Coordinate system) พิกัดฉาก ดังแสดงในรูปที่ 20 กำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ที่ปากทางออกของท่อเจ็ทแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 20((ก) และ (ข)) โดยให้แกน Z มีทิศทางไปตามการไหลของเจ็ท และแกน X และ Y อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของเจ็ท



(ก) เจ็ทท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ (Expansion pipe)



(ข) เจ็ทแบบติดปลอกท่อ (Sleeve pipe)

รูปที่ 20 แสดงระบบพิกัดฉากที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศและแบบติดตั้งปลอกท่อ

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

เจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ (Expansion pipe)	
รายละเอียด	เงื่อนไข
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (d)	17.2 mm
อุณหภูมิเจ็ท (T_j)	27°C
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อขยายหน้าตัด (D)	4d
ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H)	4d, 6d และ 8d
ความยาวท่อขยายหน้าตัด (L)	2d
จำนวนรูที่เจาะเหนี่ยวนำอากาศ (N)	4, 6 และ 8
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะ (d_h)	0.5d
ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)	20,000
เจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ (Sleeve pipe)	
รายละเอียด	เงื่อนไข
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (d)	17.2 mm
อุณหภูมิเจ็ท (T_j)	27°C
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของปลอกท่อ (D)	2d, 3.3d, 4d, 6d และ 8d
ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H)	4d, 6d, 8d, 10d และ 12d
ความยาวของปลอกท่อ (L)	2d, 4d และ 6d
ระยะจากปากทางออกของปลอกท่อถึงพื้นผิวพุ่งชน (S)	2d, 4d และ 6d
ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)	10,000, 15,000, 20,000, 25,000 และ 30,000

3.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

3.3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

รูปที่ 21 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทอากาศพุ่งชน สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

(1) โบลเวอร์ (Blower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการไหลในระบบโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 750 W เป็นตัวขับใบพัดของโบลเวอร์ และใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้ได้อัตราการไหลตามที่กำหนด

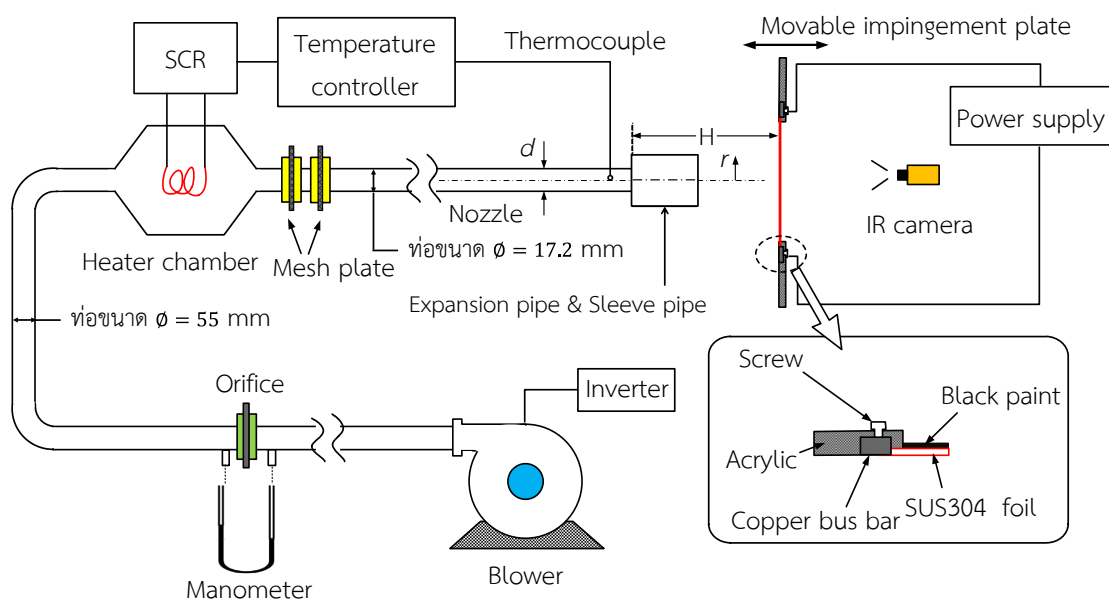
(2) ออร์ฟิส (Orifice) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศ จะติดตั้งไว้ระหว่างท่อที่มีอากาศไหลผ่าน และตัวออร์ฟิสใช้หน้าแปลนเจาะรูตรงกลางแผ่น เพื่อให้ความดันลดลง (Pressure drop) แล้วเจาะช่องเพื่อต่อสายวัดความดันที่ทางเข้าและทางออกของแผ่นออร์ฟิส โดยใช้मानอมิเตอร์แบบเอียง (Inclined manometer) ที่บรรจุน้ำเป็นของเหลววัดความดัน

(3) ฮีตเตอร์และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Heater and temperature controller) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทให้คงที่ ในการทดลองใช้ฮีตเตอร์เป็นตัวให้ความร้อน จากนั้นทำการควบคุมฮีตเตอร์ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ ในการทดลองอุณหภูมิของเจ็ทจะควบคุมให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิในห้องทดลองเท่ากับ $27 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$

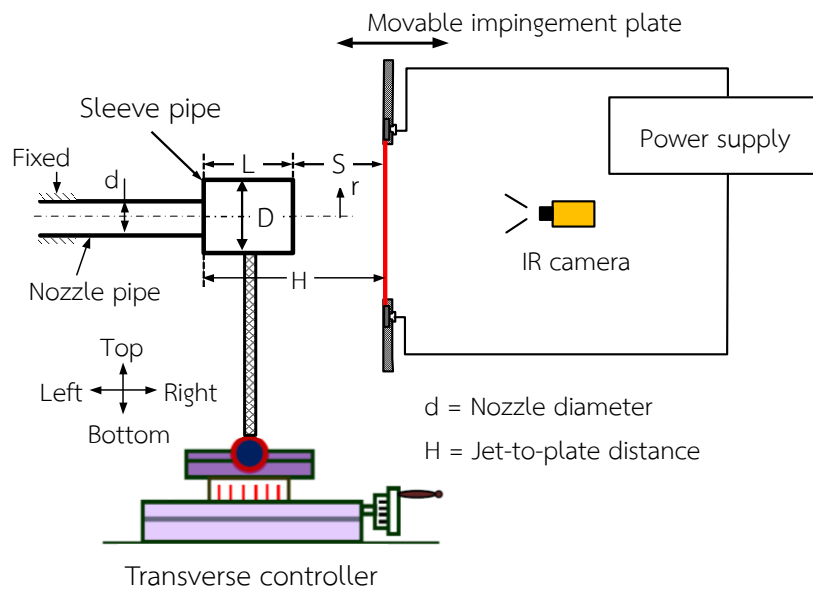
(4) ท่อเจ็ท (Nozzle pipe) ทำจากท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 17.2 mm และความยาวท่อทั้งหมด 400 mm ซึ่งมีความยาวเพียงพอที่ทำให้เจ็ทเกิดการไหลพัฒนาตัวแล้ว (Fully developed flow)

(5) ผนังที่เจ็ทพุ่งชน (Jet impingement wall) ในการทดลองจะใช้แผ่นสแตนเลสแบบบางที่มีความหนา 0.03 mm เป็นพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน โดยแผ่นสแตนเลสจะถูกขึงให้เรียงตั้งกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด $242 \times 242 \text{ mm}^2$ ไว้กลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสไว้ทั้งสองข้าง และแท่งทองแดงทั้งสองจะต่อเข้ากับขั้วของอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลส จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส

(6) ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ (2D Transverse system) เป็นอุปกรณ์สำหรับจับยึดปลอกท่อ (Sleeve pipe) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Y และ Z ตามพิกัดของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 21 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว



รูปที่ 22 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเจ็ทแบบติดปลอกท่อ

(7) อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายไฟกระแสตรง (DC) ให้กับแผ่นสแตนเลสเพื่อให้เกิดฟลักซ์ความร้อนขึ้น โดยสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 30 A และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 10 V

(8) กล้องบันทึกภาพแบบอินฟราเรด (Infrared camera) รุ่น Testo 882 สามารถบันทึกความละเอียดของภาพ 640×480 พิกเซล ช่วงของอุณหภูมิในการวัด -20°C ถึง 100°C ค่าความผิดพลาดในการจับภาพ $\pm 2\%$

3.3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองใช้โบลเวอร์สำหรับดูดอากาศแล้วส่งผ่านไปยังออร์ฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 21 ในการทดลองอัตราการไหลของอากาศถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับโบลเวอร์ หลังจากนั้นอากาศจะผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศโดยคอนโทรลเลอร์ อุณหภูมิของเจ็ทจะควบคุมให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศโดยรอบเท่ากับ $27 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ แล้วจึงไหลต่อเข้ากับท่อส่งอากาศไปยังหัวฉีด และอากาศไหลออกมาทางท่อหัวฉีดพุ่งชนตั้งฉากกับผนังที่ติดตั้งไว้ด้านหน้า

สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\text{Re} = \frac{\rho \bar{V}_j d}{\mu} \quad (1)$$

โดยที่ \bar{V}_j คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อเจ็ท, m/s
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3
 μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ, $\text{kg/m}\cdot\text{s}$

ในการทดลองจะใช้อุณหภูมิอากาศของเจ็ทเท่ากับ $27 \pm 0.2^\circ\text{C}$ พุงชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อระบายความร้อน โดยการจ่ายฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นสแตนเลสสามารถคำนวณได้จากสมการ (3) หลังจากที่เจ็ทพุงชนพื้นผิวจะเกิดการระบายความร้อนขึ้นบนแผ่นสแตนเลส หลังจากนั้นรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) จากนั้นบันทึกภาพที่ปรากฏบนแผ่นสแตนเลสด้วยกล้องอินฟราเรด (Infrared camera) และคัดลอกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่อไป ในการวัดอุณหภูมิที่กระจายบนพื้นผิวได้ทำการวัด 2 กรณีคือ กรณีที่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นสแตนเลส และกรณีที่ไม่มีการจ่ายฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นสแตนเลส

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h = \frac{\dot{q}_j}{T_{wh} - T_{wnh}} = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{lost}}{T_{wh} - T_{wnh}} \quad (2)$$

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

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A} \quad (3)$$

- โดยที่ A คือ พื้นที่ของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน, m^2
 I คือ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส, A
 V คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดจากแท่งทองแดงที่ติดคล่อม, Volt

สำหรับการคำนวณการสูญเสียความร้อนด้านหลังของแผ่นสแตนเลส โดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และการแผ่รังสีความร้อน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\dot{q}_{lost} = \dot{q}_{convection} + \dot{q}_{radiation} \quad (4)$$

ฟลักซ์ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

$$\dot{q}_{convection} = h_L \cdot (\bar{T}_{wh} - T_s) \quad (5)$$

เมื่อ

$$h_L = \frac{Nu_L k}{L_{cl}} \quad (5.1)$$

$$L_{cl} = \frac{W_{st} \cdot L_{st}}{[(W_{st}^2) + (L_{st}^2)]} \quad (5.2)$$

ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ สำหรับกรณีแผ่นเรียบบางในแนวตั้ง

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.67Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (5.3)$$

เมื่อ

$$Ra_L = \frac{g\beta \cdot (\bar{T}_{wh} - T_s)(L_{cl})^3}{\nu\alpha} \quad (5.4)$$

ฟลักซ์ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน

$$\dot{q}_{radiation} = \sigma\epsilon \cdot (\bar{T}_{wh}^4 - T_s^4) \quad (6)$$

ค่านัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทไหลพุ่งชนคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (7)$$

ค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}d}{k} \quad (8)$$

เมื่อ

$$\bar{h} = \frac{\dot{q}_{input} - \sigma\epsilon \cdot (\bar{T}_{wh}^4 - T_s^4) - h_L \cdot (\bar{T}_{wh} - T_s)}{\bar{T}_{wh} - \bar{T}_{wnh}} \quad (9)$$

โดยที่	d	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท, m
	g	คือ	ค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 m/s ²
	h _L	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ, W/m ² ·°C
	\bar{h}	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน, W/m ² ·°C
	k	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิ 26°C, W/m·°C
	L _{cl}	คือ	ค่าความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) ของพื้นผิว
	L _{st}	คือ	ความยาวของแผ่นสเตนเลส เท่ากับ 0.242 m
	Nu _L	คือ	ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ที่สูญเสียจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

Pr	คือ	ค่า Prandtl number
Ra_L	คือ	ค่า Rayleigh number
T_s	คือ	อุณหภูมิภายในห้องทดลอง, °C
T_{wh}	คือ	อุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่มีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน, °C
T_{wnh}	คือ	อุณหภูมิบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนที่ไม่มีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน, °C
\bar{T}_{wh}	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่มีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน, °C สำหรับการแผ่รังสีความร้อน ($\bar{T}_{wh} + 273.15$), K
\bar{T}_{wnh}	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ไม่มีการถ่ายฟลักซ์ความร้อน, °C สำหรับการแผ่รังสีความร้อน ($\bar{T}_{wnh} + 273.15$), K
W_{st}	คือ	ความกว้างของแผ่นสเตนเลส เท่ากับ 0.242 m
α	คือ	ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity), $W/m \cdot ^\circ C$
β	คือ	สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามความร้อนเชิงปริมาตร
ε	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน
σ	คือ	ค่าคงที่ของ Stefan boltzman เท่ากับ $5.670373 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
ν	คือ	ค่าความหนืดเชิงจลน์ (Kinematic viscosity), m^2/s

3.3.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว

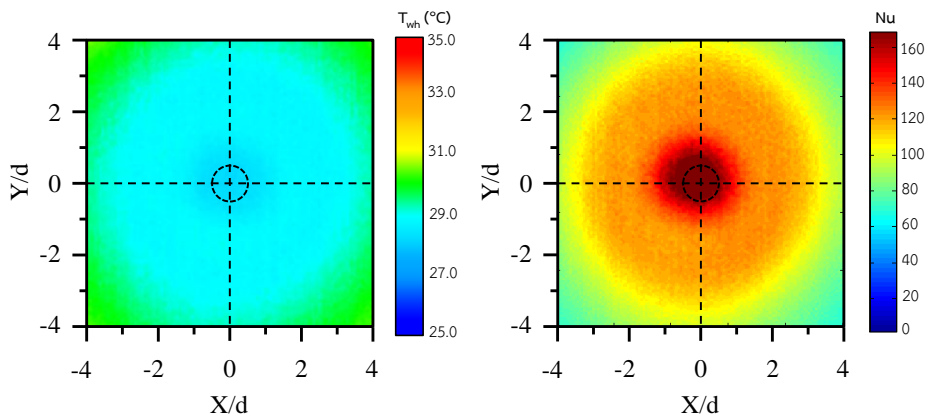
สำหรับการกระจายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิว สามารถทำได้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกอุณหภูมิที่ได้จากกล้องอินฟราเรด (Infrared camera) ซึ่งทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในช่วงที่มีฟลักซ์ความร้อน และไม่มีฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวแผ่นสเตนเลสอย่างละ 10 ชุด แล้วทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่านัสเซลต์นัมเบอร์ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) คัดแยกไฟล์ภาพที่ได้จากกล้องอินฟราเรด (Infrared camera) และทำการแปลงไฟล์ภาพโดยใช้โปรแกรมของกล้องอินฟราเรด Testo (IR Soft) เป็นข้อมูลตารางตัวเลขอุณหภูมิ
- (2) นำไฟล์ข้อมูลตารางตัวเลขอุณหภูมิทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB
- (3) เลือกข้อมูลให้เหลือเฉพาะส่วนที่ต้องการตามแนวพิกัดของแกน ดังแสดงในรูปที่

23

(4) ใช้ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวโดยสมการที่ (2) และคำนวณหาค่านัสเซลต์นัมเบอร์ที่กระจายทั่วทั้งพื้นผิว แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (7) ซึ่งตัวอย่างผลการวิเคราะห์หาค่านัสเซลต์นัมเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 23(ข)

(5) สำหรับการหาค่านัสเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ย (Average Nusselt number) ตามแนวรัศมีของเจ็ทในช่วง $0 \leq r/d \leq 4$ โดยใช้สมการที่ (8)



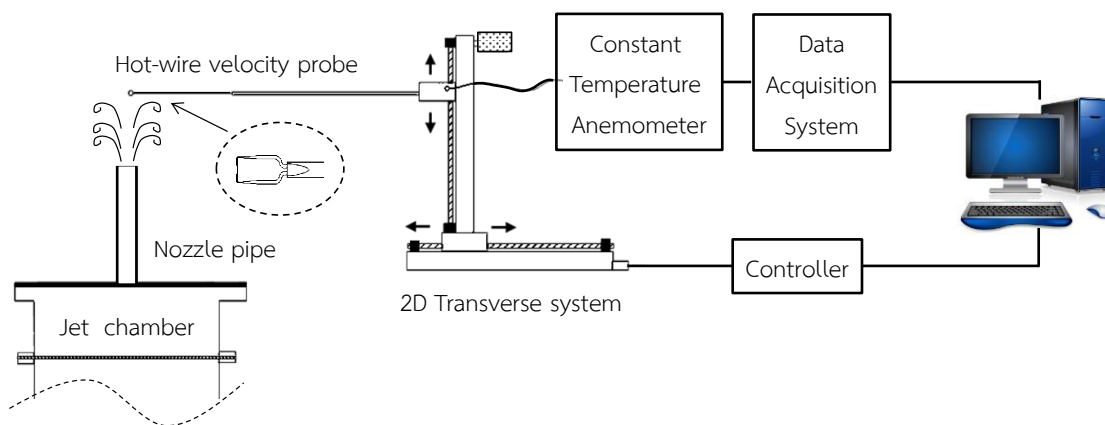
(ก) รูปที่ถ่ายจากกล้องอินฟราเรด (ข) รูปการกระจายนัสเซลต์นัมเบอร์

รูปที่ 23 แสดงตัวอย่างผลการหาค่าการกระจายของนัสเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ด้วยโปรแกรม MATLAB

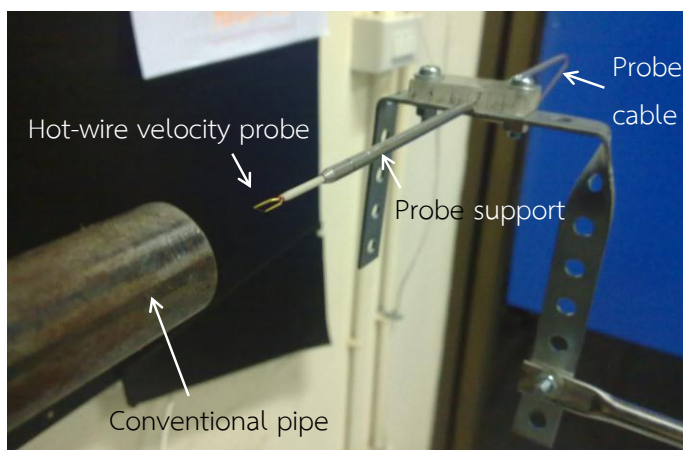
3.4 การวัดการกระจายความเร็วและความปั่นป่วน

3.4.1 รายละเอียดของชุดทดลอง

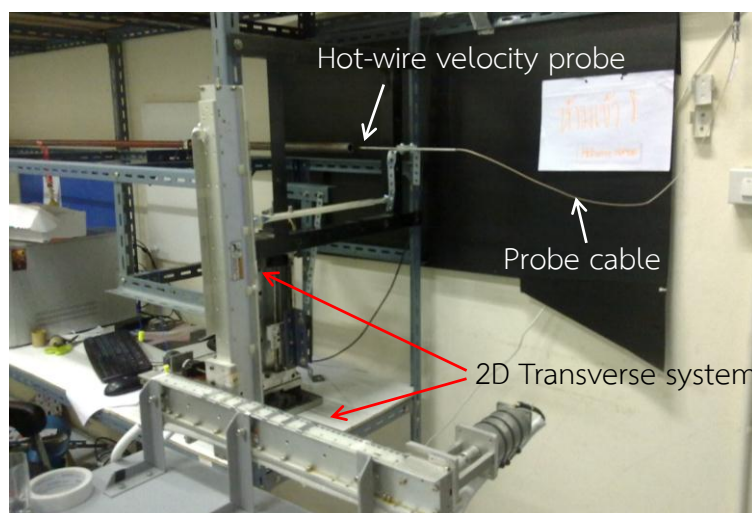
รูปที่ 24 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการวัดความเร็ว เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ท โดยติดตั้งหัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe) ดังแสดงในรูปที่ 25 ยี่ห้อ Dantec dynamics รุ่น 55B01 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดร้อน $5 \mu\text{m}$ และยาว 1.25 mm มีช่วงในการวัดความเร็วตั้งแต่ $0.05 \text{ m/s} - 500 \text{ m/s}$ มีความถี่สูงสุดในการวัด 400 kHz ต่อเข้ากับชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D Transverse system) ดังแสดงในรูปที่ 26 โดยหัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe) จะต่อกับเครื่องวัดความเร็วลมแบบอุณหภูมิคงที่ (MiniConstant temperature anemometer, MiniCTA) ยี่ห้อ Dantec dynamic รุ่น 54T30 เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากหัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe) เป็นความเร็ว และข้อมูลจะถูกเก็บด้วยตัวเก็บข้อมูล (Data acquisition system, DAQ) ยี่ห้อ National instrument measurement รุ่น NI 9215 with BNC และความเร็วในแต่ละจุดจะถูกบันทึกลงคอมพิวเตอร์



รูปที่ 24 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการกระจายความเร็ว



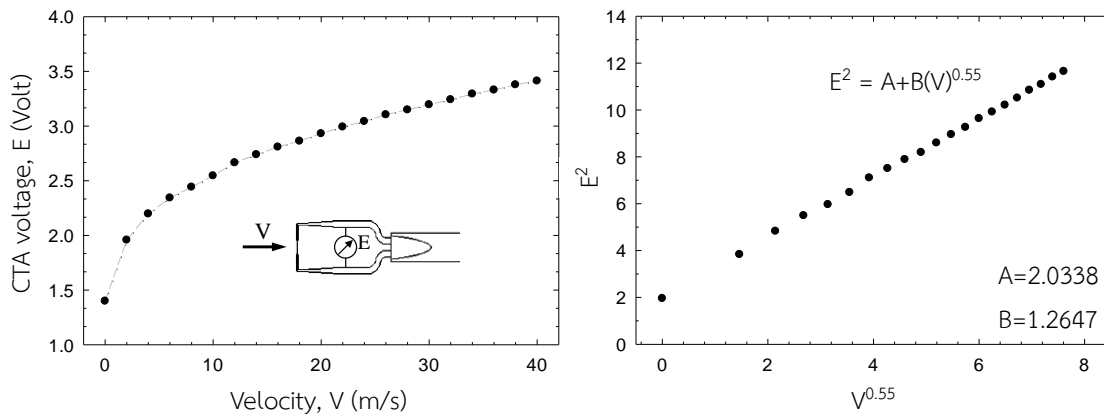
รูปที่ 25 แสดงอุปกรณ์หัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe)



รูปที่ 26 แสดงชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D Transverse system)

3.4.2 การสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน

ในการใช้หัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อนเพื่อวัดการกระจายของความเร็วเจ็ท จำเป็นต้องสอบเทียบความเร็วลมกับหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อนก่อนใช้งาน โดยมีอุปกรณ์วัดความเร็วลม Pitot static tube ต่อเข้ากับமானอมิเตอร์สำหรับวัดผลต่างความดัน และคำนวณเป็นค่าความเร็วเพื่อใช้ในการสอบเทียบ ซึ่งหัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe) และอุปกรณ์วัดความเร็วลม Pitot static tube ติดตั้งกับชุดจับยึดเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของหัววัดทั้งสองชนิด และตำแหน่งที่วัดคือ ตรงกลางของปากทางออกเจ็ท ซึ่งกำหนดช่วงความเร็วในการวัดอยู่ในช่วง 0 - 40 m/s และอุณหภูมิของเจ็ท 27°C ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ในการทดลอง โดยหัววัดความเร็วแบบลวดร้อนวัดสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า (CTA voltage, E) ดังแสดงในรูปที่ 27 แสดงผล การสอบเทียบระหว่างความเร็วของเจ็ท และแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเจ็ทและแรงดันไฟฟ้าจากการสอบเทียบหัววัดความเร็วลมแบบลวดร้อน

ผลการสอบเทียบความเร็วของหัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire velocity probe) จะได้สมการทำนายความเร็วดังนี้

$$E^2 = 2.0338 + 1.2647(V)^{0.55} \quad (10)$$

3.4.3 วิธีการทดลอง

สำหรับการวัดการกระจายความเร็วของเจ็ท ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิของเจ็ทให้คงที่ที่ 27°C และค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) คงที่เท่ากับ 20,000 กำหนดตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ท โดยหัววัดความเร็วลมเลื่อนตามแนวแกน Y อยู่ในช่วง $-2.5 \leq Y/d \leq 2.5$ ที่ระยะห่างจากปากทางออกท่อเจ็ท $H=2d$ และ $4d$ ดังแสดงในรูปที่ 28 และตามแนวแกน Z จะกำหนดจุดอ้างอิงของแกน (YZ-axis) ตรงปากทางออกของเจ็ทท่อปกติ (Conventional pipe) โดยทำการวัดอยู่ในช่วง $0 \leq Z/d \leq 8$ ดังแสดงในรูปที่ 29 ในการเคลื่อนที่ของหัววัดความเร็วแบบลวดร้อน (Hot-wire probe) ไป ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการวัดจะใช้ชุดควบคุมอัตโนมัติปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ 2 แกน (2D-Transverse system) และในการเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูล (Sample of frequency) 1 kHz และตัวอย่างในการเก็บข้อมูล (Number of samples) เท่ากับ 10,000 แล้วนำข้อมูลของการกระจายความเร็วที่ได้มาวิเคราะห์เพื่ออธิบายโครงสร้างการไหล

สำหรับความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของท่อเจ็ท (\bar{V}_j) ที่ใช้ในการทดลองคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\bar{V}_j = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (11)$$

สำหรับความเร็วที่เปลี่ยนแปลง ณ เวลาใดๆ (V'_i) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$V'_i = V_i - \bar{V}_j \quad (12)$$

สำหรับความเร็วของรากกำลังสองเฉลี่ย (V_{rms}) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V'_i)^2}{N-1}} \quad (13)$$

สำหรับอัตราส่วนความเร็ว (Normalized velocity) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$\text{Normalized velocity} = \frac{\bar{V}_j}{V_{\text{max}}} \quad (14)$$

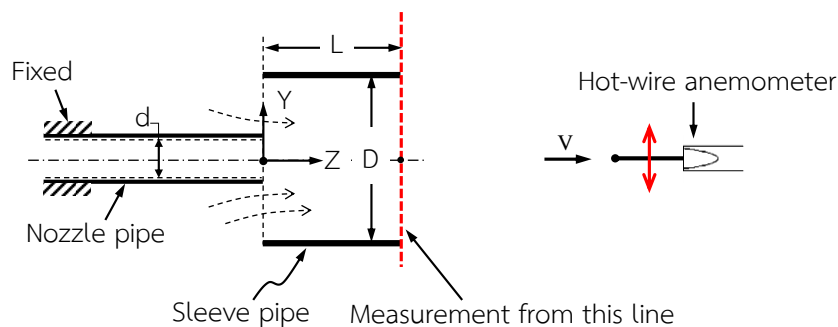
สำหรับระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity, Tu) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$Tu = \frac{V_{\text{rms}}}{V_j} \quad (15)$$

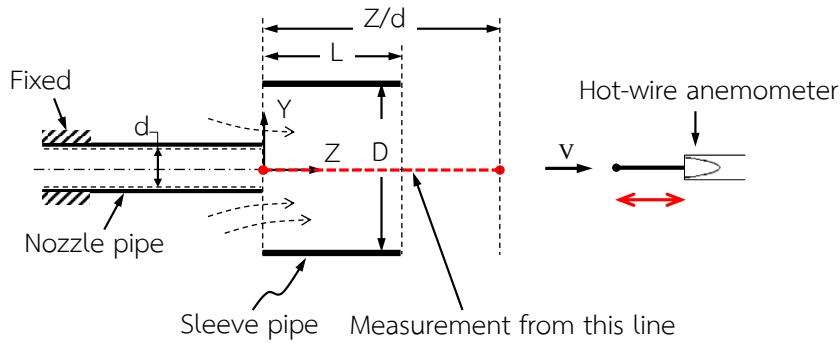
สำหรับพลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$k = \frac{1}{2} \overline{V'_i V'_i} = \frac{1}{2} (\overline{V_x'^2} + \overline{V_y'^2} + \overline{V_z'^2}) = \frac{3}{2} \overline{V_j'^2} \quad (16)$$

โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูลของความเร็วทั้งหมด
 V_i คือ ความเร็วที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ, m/s



รูปที่ 28 แสดงตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทตามแนวแกน Y



รูปที่ 29 แสดงตำแหน่งวัดการกระจายความเร็วของเจ็ทตามแนวแกน Z

4. การจำลองการไหลด้วยวิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

4.1 สมการควบคุมการไหล

พฤติกรรมของการไหลของของไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการหลัก 3 สมการคือ สมการกฏทรงมวล (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) ซึ่งเป็นสมการควบคุมการไหลแบบคงที่ 3 มิติ และเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) สมการควบคุมการไหลในการคำนวณ ดังต่อไปนี้

สมการกฏทรงมวล (Continuity Equation)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{V_i' V_j'} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (18)$$

สมการพลังงาน (Energy Equation)

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{V_i' T'} \right] \quad (19)$$

โดยที่ c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, kJ/kg·K

U_i, U_j คือ ส่วนประกอบของความเร็วเฉลี่ย, m/s

T คือ อุณหภูมิของของไหล, °C

4.2 แบบจำลองความปั่นป่วน

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของการไหลได้โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Shear stress transport k- ω model (SST k- ω model) พัฒนาโดย Menter's [13] ได้รวมเอาแบบจำลอง 2 ชนิดผสมผสานเข้าด้วยกันระหว่างการจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นไกลจากผนัง (Outer layer) และการจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ω model สำหรับการคำนวณการไหลที่บริเวณชั้นชิดผนัง (Inner layer) ดังแสดงในรูปที่ 30 ซึ่งการสับเปลี่ยนแบบจำลองสามารถทำได้โดยใช้ Blending function ปรับเปลี่ยนค่าคงที่ของแบบจำลอง นอกจากนี้แบบจำลองแบบ SST k- ω model ได้ทำการปรับปรุงค่า Eddy viscosity โดยการบังคับค่า Turbulent shear stress ให้มีขอบเขต การปรับปรุงนี้ทำให้การทำนายการไหลที่มี Adverse pressure gradient, Airfoils และ Transonic shock-waves ได้ดีขึ้น [14]

สมการพลังงานความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j k)}{\partial x_j} = \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta^* k \rho \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (20)$$

สมการอัตราการสลายตัวเฉพาะ (Specific dissipation rate, ω)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j \omega)}{\partial x_j} = & \frac{\alpha}{v_t} \tau_w \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ & + 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (21)$$

สมการ Blending function, F_1

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (22)$$

เมื่อ

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (22.1)$$

สมการความหนืดแบบปั่นป่วน (Turbulent viscosity)

$$\mu_t = \min\left(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{SF_2}\right); a_1 = 0.31 \quad (23)$$

สมการ Blending function, F_2

$$F_2 = \tanh\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega}\right)\right]^2 \quad (24)$$

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

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองดั้งเดิมกำหนดเป็นดังนี้

- สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านในชั้นขีตผิว (Inner layer)

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

- สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองด้านนอกชั้นขีตผิว (Outer layer)

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

โดยที่	τ_w	คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress), N/m^2
	σ_k	คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับพลังงานจลน์ปั่นป่วน
	σ_ω	คือ ความปั่นป่วนของแพลนทินัมเบอร์สำหรับอัตราการสลายเฉพาะ
	v_t	คือ ความหนืดไหลวนคิเนเมติก (Kinematic eddy viscosity), m^2/s
	$CD_{k\omega}$	คือ การแพร่ผ่านในแนวขวาง (Cross-diffusion)

4.3 การไหลบริเวณชั้นขีตผนัง

การไหลในกลุ่มที่มีผนังที่เป็นของแข็งมาเกี่ยวข้องทำให้มีโครงสร้างที่แตกต่างจากการไหลปั่นป่วนแบบอิสระ ระบบตัวแปรไร้มิติจึงได้นำมาใช้เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาความเชื่อมโยงของผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับการไหลของของไหลที่ขอบขีตผนังจะประกอบไปด้วยบริเวณหลักๆ 2 บริเวณคือ บริเวณชั้นใน (Inner layer) ซึ่งมีระยะประมาณ 10% ถึง 20% ของชั้นความหนาขีตผิว ค่าของความเค้นเฉือนเกือบจะคงที่ และมีค่ากับความเค้นเฉือนที่ผนัง τ_w ที่ชั้นนี้จะมีชั้นย่อยๆ 3 ชั้นคือ Linear sub-layer ซึ่งความหนืดมีอิทธิพลหลักต่อการไหล ชั้นที่สอง Buffer layer ทั้งความหนืด และความปั่นป่วนมีอิทธิพลต่อการไหลในระดับเกือบเท่ากัน และชั้นที่สามคือ Log-law ความปั่นป่วนเป็นตัวการหลักที่ส่งผลต่อความเค้นเฉือนสำหรับบริเวณชั้นนอก (Outer layer) หรือ

Law of the wake เป็นบริเวณที่การไหลได้รับอิทธิพลของความเฉื่อยของการไหลเป็นหลัก และเป็นอิสระต่อปัจจัยด้านความหนืดของของไหล ดังแสดงในรูปที่ 30

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

$$y^+ = \frac{yV_\tau}{\nu} \quad (25)$$

เมื่อ

$$V_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (26)$$

ความเร็วไร้มิติ (Dimensionless velocity) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

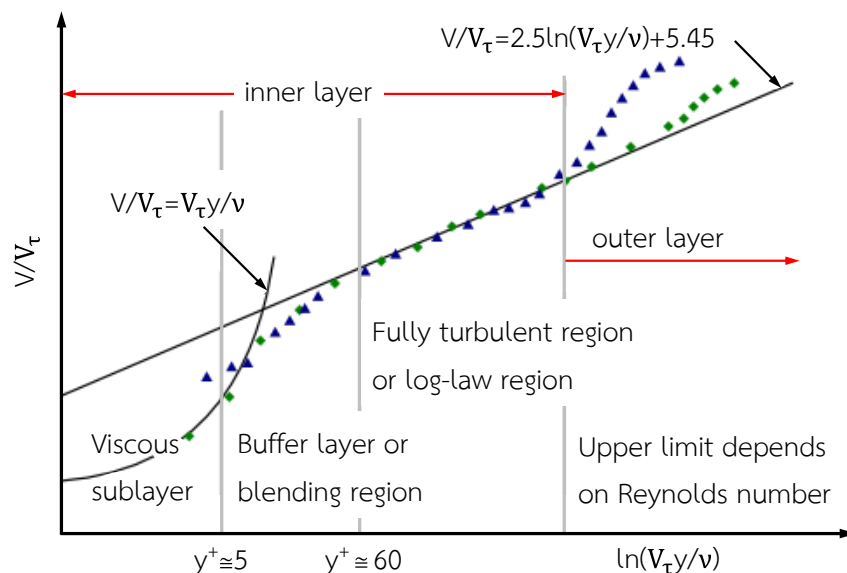
$$V^+ = \frac{V}{V_\tau} \quad (27)$$

โดยที่ V คือ ความเร็ว (Velocity), m/s

V_τ คือ ความเร็วเฉือน (Shear velocity), m/s

τ_w คือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress), N/m^2

y คือ ระยะห่างจากชั้นขีตผนัง, m



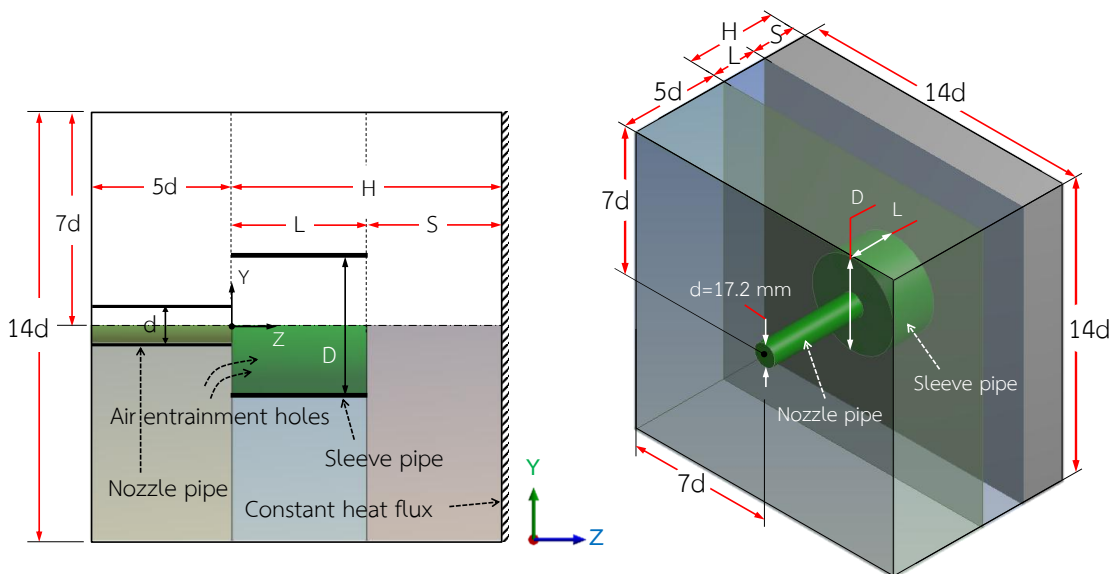
รูปที่ 30 แสดงการกระจายความเร็วที่บริเวณใกล้ผนัง [15]

4.4 การสร้างแบบจำลอง

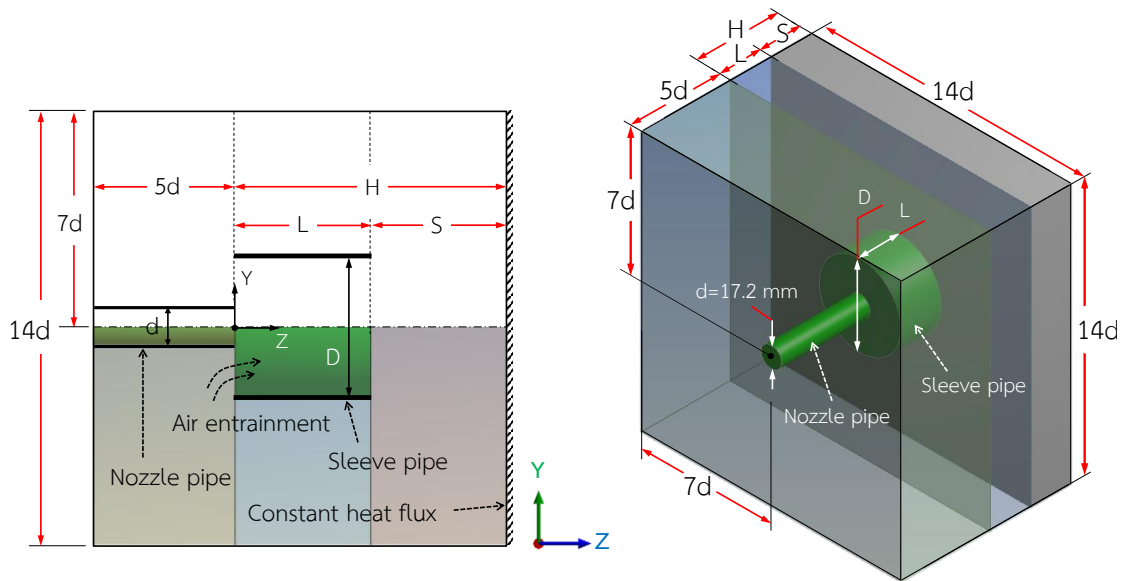
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS Version 13.0 (Fluent) โดยสร้างแบบจำลอง 3 มิติให้เหมือนกับการทดลอง แบบจำลองการไหลแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

(1) แบบจำลองการไหลของท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 31 จากรูปโมเดลประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เป็นท่อเจ็ท มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เท่ากับ 17.2 mm ท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ $D=4d$ ความยาวของท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ คงที่ $L=2d$ ส่วนที่สองเป็นส่วนของรูเจาะเพื่อเหนี่ยวนำอากาศ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $0.5d$ จำนวนรูที่เจาะ 4 และ 8 รู สำหรับส่วนที่สามเป็นส่วนของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว มีขนาดกว้าง×ยาว เท่ากับ $14d \times 14d$ และระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d, 6d$ และ $8d$ ตามลำดับ

(2) แบบจำลองการไหลของท่อเจ็ทพุ่งชนแบบติดปลอกท่อ ดังแสดงในรูปที่ 32 จากรูป แบบจำลองประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เป็นท่อเจ็ท มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่เท่ากับ 17.2 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกท่อ ที่ $D=2d, 3.3d, 4d, 6d$ และ $8d$ โดยมีความยาวของปลอกท่อ ที่ $L=2d, 4d$ และ $6d$ ตามลำดับ ส่วนที่สองเป็นส่วนของบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว มีขนาดกว้าง×ยาว เท่ากับ $14d \times 14d$ และระยะจากปากทางออกท่อเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d, 6d, 8d, 10d$ และ $12d$ ตามลำดับ



รูปที่ 31 แสดงแบบจำลองของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ



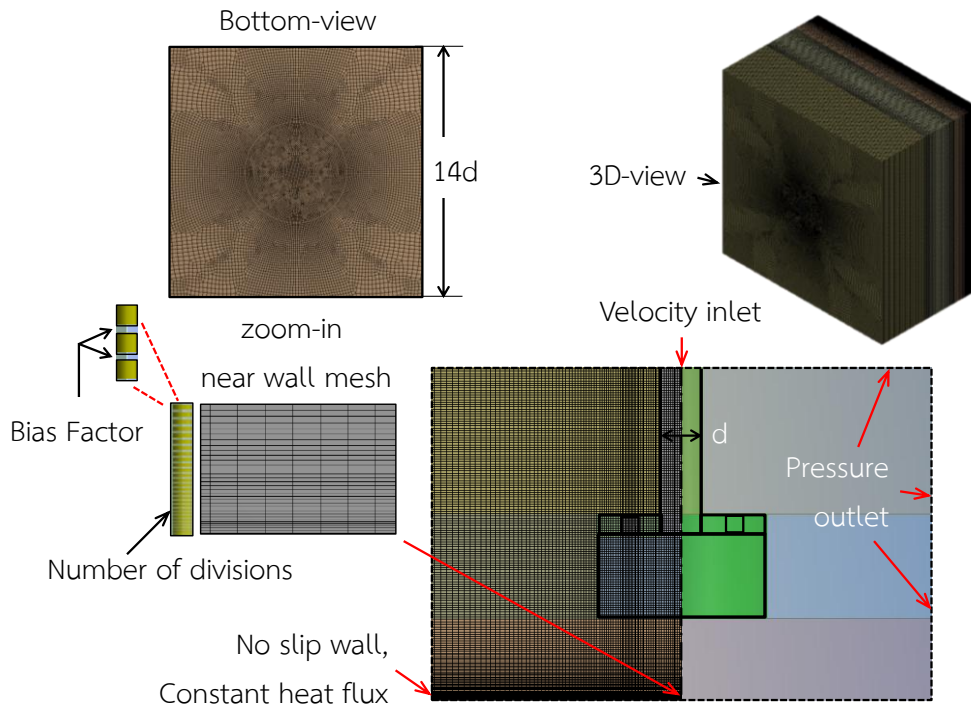
รูปที่ 32 แสดงแบบจำลองของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

4.5 การสร้างกริด

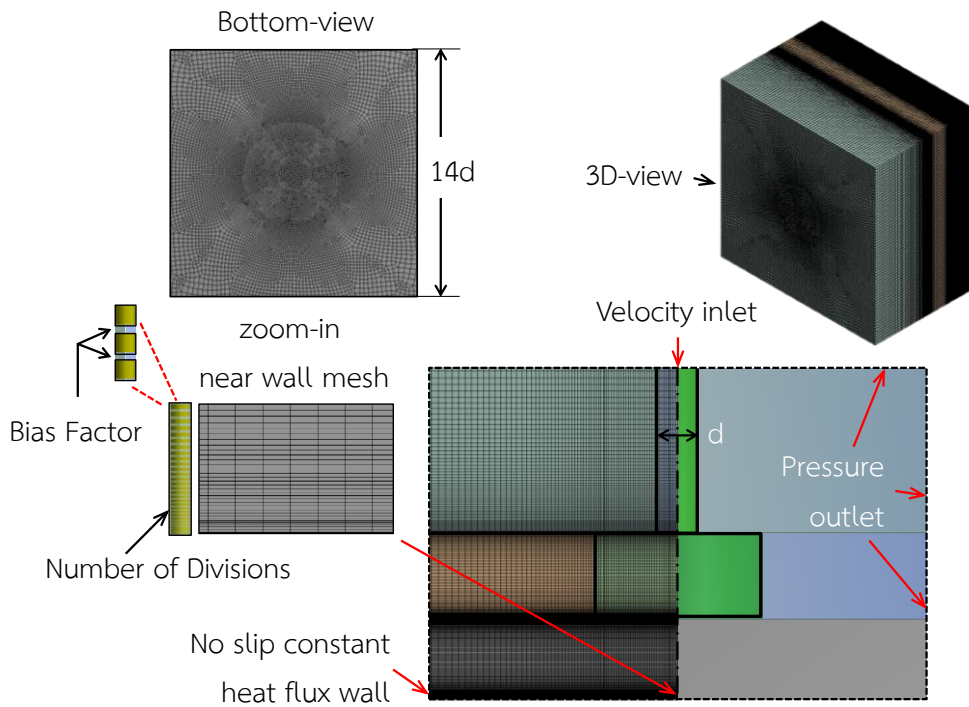
กริด (Mesh) ที่ใช้ในแบบจำลองจะมีลักษณะเป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ลักษณะกริดของแบบจำลองเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 33 และเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อ ดังแสดงในรูปที่ 34 โดยบริเวณตรงกลางจากปากทางออกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และพื้นที่ผิวพุ่งชนมีความละเอียดสูง ซึ่งบริเวณดังกล่าวต้องการความละเอียดในการคำนวณสูง บริเวณปากทางออกของเจ็ท และพื้นที่ผิวพุ่งชนมีลักษณะกริด (Mesh) เป็นชั้น ๆ ซึ่งมีความละเอียดสูงจากปลายทั้งสองข้าง ความละเอียดจะลดลงเมื่อห่างจากบริเวณปากทางออกของเจ็ท และพื้นที่ผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในขั้นตอนการสร้างกริดนี้ ได้กำหนดพื้นผิวของแบบจำลองเพื่อสร้างเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ

สำหรับการไหลบริเวณใกล้พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ไหลออกจากท่อเจ็ทอย่างกะทันหัน ซึ่งบริเวณดังกล่าวต้องการความแม่นยำสูง จึงมีการกำหนดค่า $y^+ \cong 5$ [16] โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 24 คำนวณบริเวณใกล้ชั้นขีดผนัง (Near-wall) ที่เจ็ทพุ่งชน โดยการกำหนดอัตราส่วนของกริด (Mesh) บริเวณชั้นขีดผนังดังต่อไปนี้

- จำนวนแถวที่ต้องการแบ่งกริด (Number of divisions) เท่ากับ 200
- อัตราส่วนการแบ่งกริด (Bias factor) เท่ากับ 10



รูปที่ 33 แสดงรายละเอียดของกริดภายในของแบบจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ

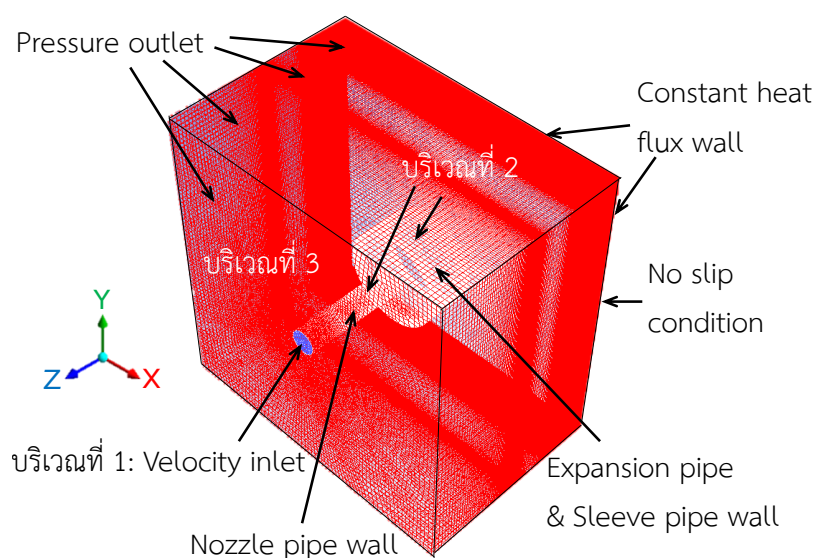


รูปที่ 34 แสดงรายละเอียดของกริดภายในของแบบจำลองการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

4.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สำหรับการจำลองการไหลของเจ็ทที่ไหลพุ่งชนพื้นผิวแบบไหลต่อเนื่อง ได้วิเคราะห์การไหลเป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady flow) ไม่พิจารณาผลจากการถ่ายเทความร้อนและไม่คิดการสูญเสียความร้อน โดยกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ ไม่คิดผลของความเร่งโน้มถ่วงสำหรับโมเดลของความปั่นป่วนใช้แบบจำลอง Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST) model โดยบริเวณผนังที่เจ็ทพุ่งชนกำหนดเป็นแบบไม่มีการลื่นไถล (No slip condition)

จากรูปที่ 35 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการไหล ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 บริเวณหลักๆ คือ บริเวณที่ 1 Velocity inlet (สีน้ำเงิน) คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางเข้าของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางเข้าในรูปของความเร็วของการไหล ส่วนที่ 2 Wall (สีขาว) คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นผนังของการไหล ซึ่งพื้นที่ที่กำหนดจะอยู่ในส่วนของผนังของท่อเจ็ท ท่อขยายหน้าตัดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศ และพื้นที่ผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ บริเวณที่ 3 Pressure outlet (สีแดง) คือ พื้นผิวที่กำหนดให้เป็นทางออกของการไหล โดยกำหนดลักษณะของทางออกในรูปแบบของความดันที่ทางออกของการไหล



รูปที่ 35 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองการไหล

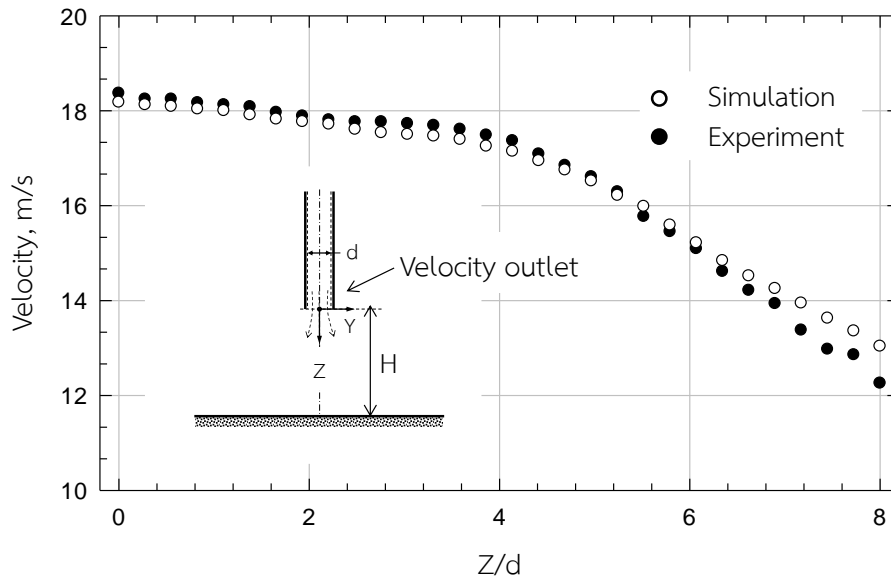
การกำหนดเงื่อนไขของผนังของการไหล ความดันทางออก และความเร็วได้กำหนดดังต่อไปนี้

เงื่อนไขขอบเขตทางออก

- (1) กำหนดความเร็วของไหลที่ปากทางออกของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติเท่ากับการทดลองจริง ดังแสดงในรูปที่ 36 ที่ $Re=20,000$
- (2) กำหนดอุณหภูมิทางปากทางออกเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติเท่ากับ 27°C (300 K)
- (3) กำหนดให้ความดันทางออกของการไหลเท่ากับความดันบรรยากาศ (ความดันเกจมีค่าเท่ากับ 0 Pa)
- (4) กำหนดอุณหภูมิทางออกเท่ากับ 26°C (299 K) ซึ่งเท่ากับการทดลองจริง

เงื่อนไขขอบเขตของผนังพุงชน

- (1) กำหนดให้ผนังไม่มีการไถลหรือเคลื่อนที่ (No slip condition)
- (2) กำหนดฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) บนผนังพุงชนเท่ากับการทดลองจริง



รูปที่ 36 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วของเจ็ทพุงชนที่ปากทางออกเจ็ทที่อวกติระหว่งการทดลองกับการจำลองการไหลทางพลศาสตร์ของไหล (ที่ระยะพุงชน $H=8d$)

4.7 วิธีการคำนวณ

สำหรับวิธีการคำนวณ ได้กำหนดอัลกอริทึมเป็นแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) โดยรายละเอียดของ Spatial discretization ในแต่ละสมการที่ใช้ในการคำนวณกำหนดตามตารางที่ 2 โดยกำหนดเงื่อนไขในการหยุดประมวลผลที่ค่าความผิดพลาด (Residuals) เท่ากับ 1×10^{-4} [16]

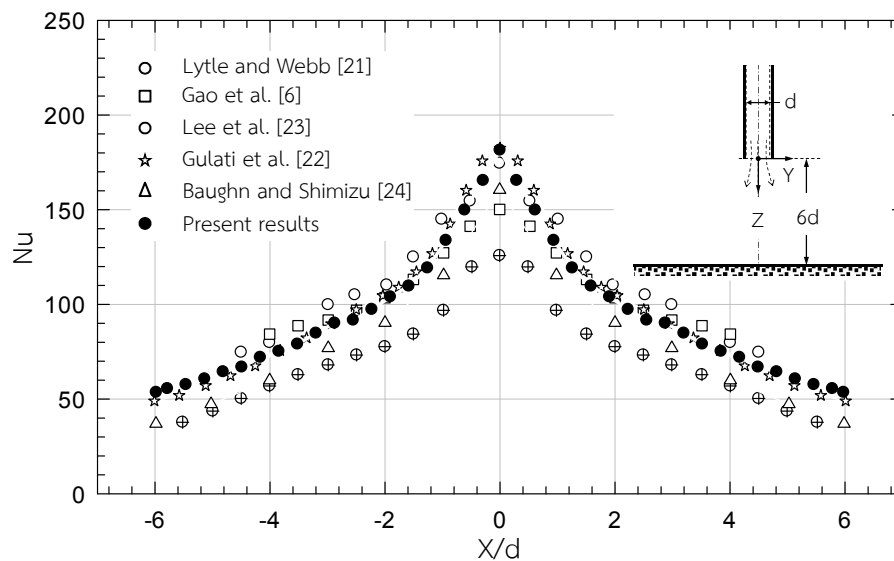
ตารางที่ 2 แสดงการกำหนดรายละเอียดของเงื่อนไข Spatial discretization [17]

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

5. ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับหัวข้อผลการทดลองและอภิปรายผลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นผลการศึกษาในกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ และส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ

รูปที่ 37 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $H/d=6$ เรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re=23,000$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท $d=17.2$ mm ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ โดยภาพรวมพบว่า ลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Lytle, Webb [18], Gao [6] และงานวิจัยของ Gulati [19] ที่ได้ใช้แผ่นสแตนเลสบาง (Stainless foil) เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน จากการทดลองพบว่า การกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์มีลักษณะที่สอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Lee [20], Baughn และ Shimizu [21] ให้ลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์ต่ำกว่าการทดลอง (Present results) เนื่องจากพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้ใช้แผ่น Liquid crystal thermography ในการทดลอง และอาจจะเกิดจากความหนา (Thickness) ของพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนซึ่งมีความสำคัญต่อการนำความร้อน และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient)



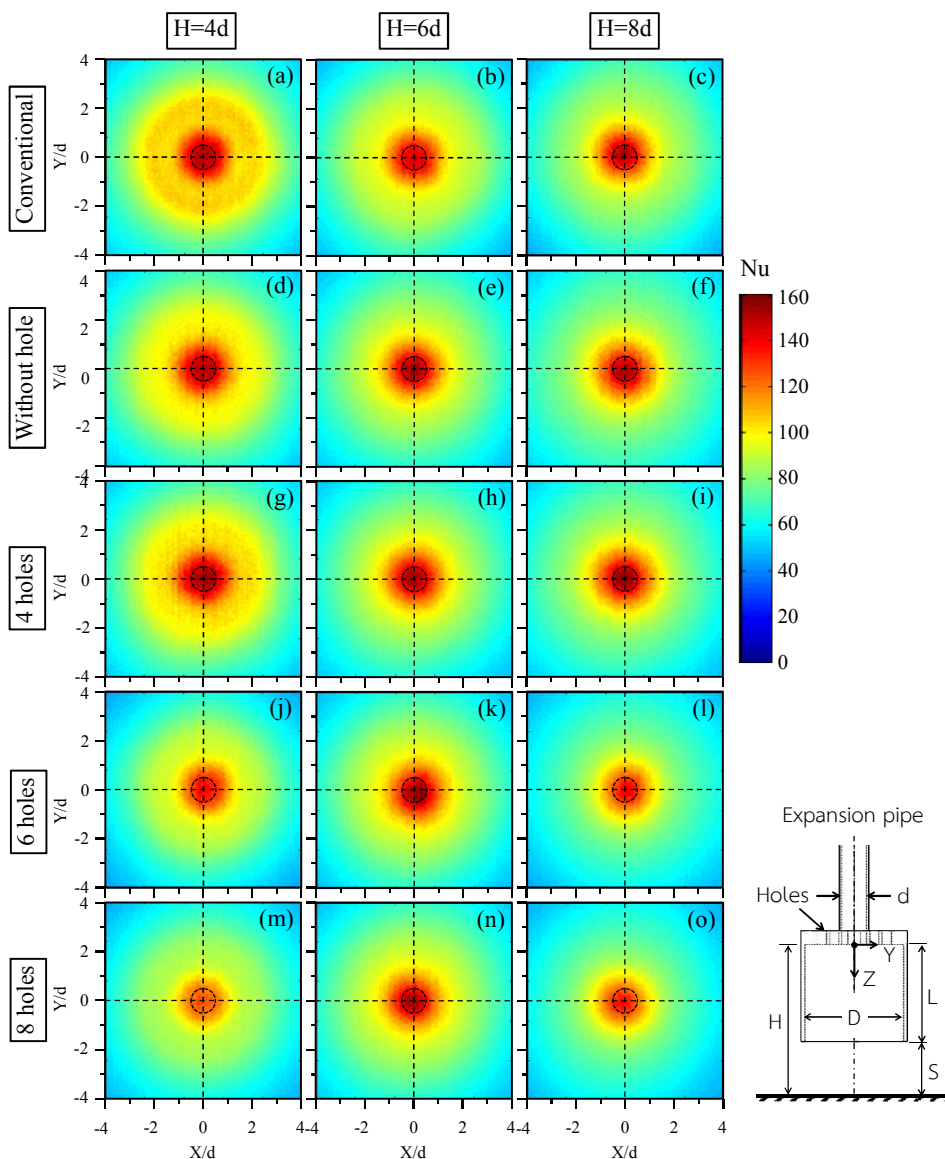
รูปที่ 37 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวศูนย์กลางท่อเจ็ทกับงานวิจัยอื่นๆ (ที่เงื่อนไข $H/d=6$, เจ็ทอากาศ, $Re=23,000$)

5.1 กรณีศึกษาเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ

5.1.1 ลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 38 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณีระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$, $H=6d$ และ $H=8d$ โดยภาพรวมนัสเซิลต์นัมเบอร์มีค่าสูงบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และจะค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมี สำหรับกรณีของเจ็ทจากท่อปกติ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ (รูปที่ 38(a)) จะปรากฏบริเวณที่มีค่านัสเซิลต์-

นัมเบอร์สูงสุดอยู่สองตำแหน่งคือ บริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และอยู่บริเวณในช่วง $-2 \leq X/d \leq 2$ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป สำหรับกรณีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ในช่วงที่ต่ำ [22] ในกรณีของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำของอากาศแบบ 4 รู (รูปที่ 38(g)) จะปรากฏบริเวณที่มีค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงสุดอยู่สองตำแหน่งเช่นเดียวกับเจ็ทท่อกปกติ แต่ในกรณีของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัด (รูปที่ 38(d), 38(j) และ 38(m)) จะไม่ปรากฏบริเวณค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงสุดลำดับที่สอง (Secondary peak) โดยค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงสุดจะปรากฏบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) เพียงแค่จุดเดียว ในขณะที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น $H=6d$ และ $8d$ การกระจายนัสเชิลต์นัมเบอร์มีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อกปกติ



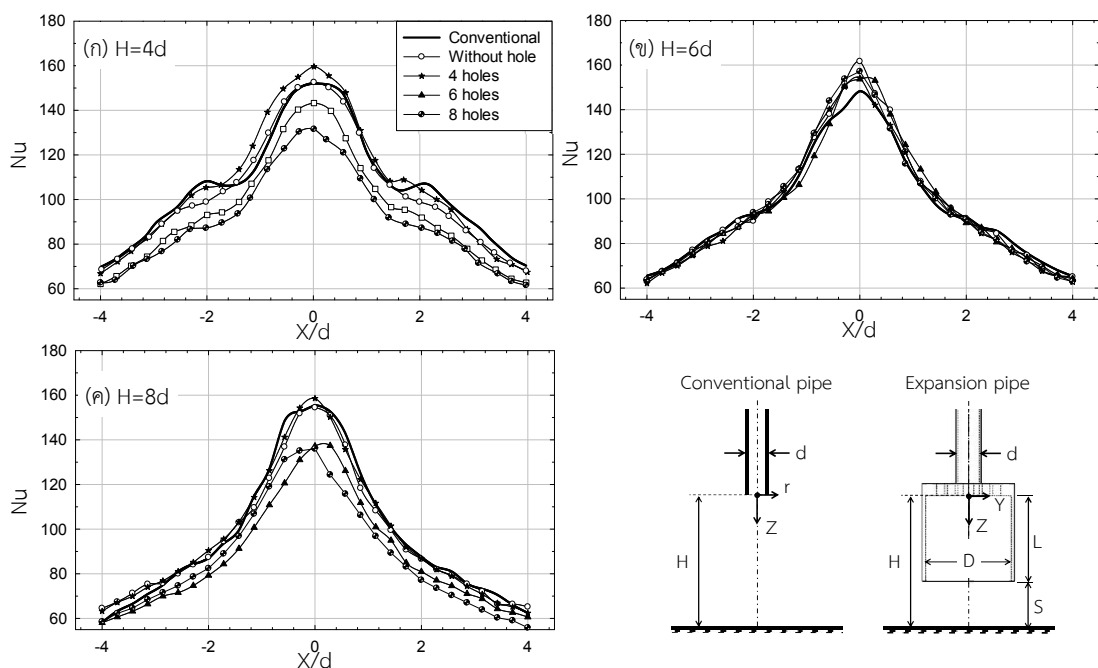
รูปที่ 38 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (ที่เงื่อนไข $L=2d$, เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.1.2 ลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่ง

ชน

รูปที่ 39 แสดงลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขความยาวของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ $L=2d$ และระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$, $6d$ และ $8d$ ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า เจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ สำหรับบางกรณีสามารถให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์สูงกว่าเจ็ทจากท่อปกติ โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน อยู่ในช่วง $-2 \leq X/d \leq 2$ ในกรณีระยะพุ่งชน $H=4d$ (รูปที่ 39(ก)) ที่เงื่อนไขท่อขยายหน้าตัดที่ไม่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ และกรณีท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศแบบ 4 รู ให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์ที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงกว่า 2.60% และ 6.68% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ ก่อนพุ่งชนพื้นผิวมีค่าสูงกว่าเจ็ทท่อปกติ

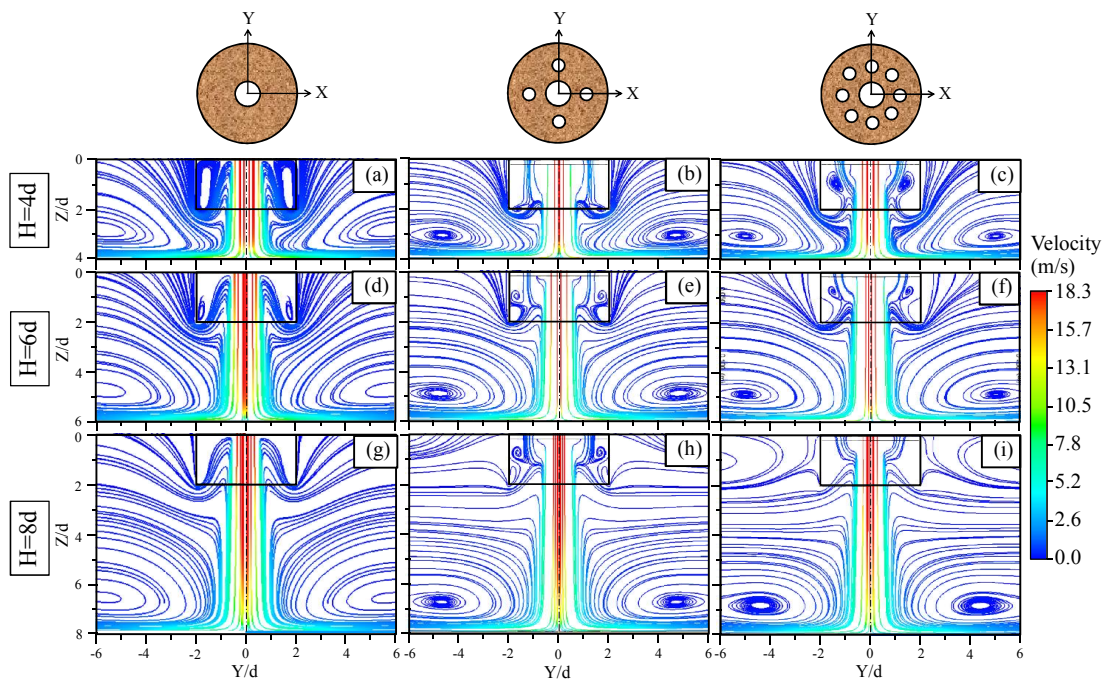
สำหรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ (รูปที่ 39(ข)) เจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดแบบไม่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ และกรณีเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศแบบ 8 รู ให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงกว่า 9.01% และ 5.98% เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ส่วนกรณีที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ (รูปที่ 39(ค)) เจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศแบบ 4 รู ให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงกว่า 2.01% เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ แต่กรณีอื่นๆ ให้ค่าสเกลต์นัมเบอร์บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนต่ำกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ



รูปที่ 39 แสดงลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.1.3 เส้นทางความเร็วจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

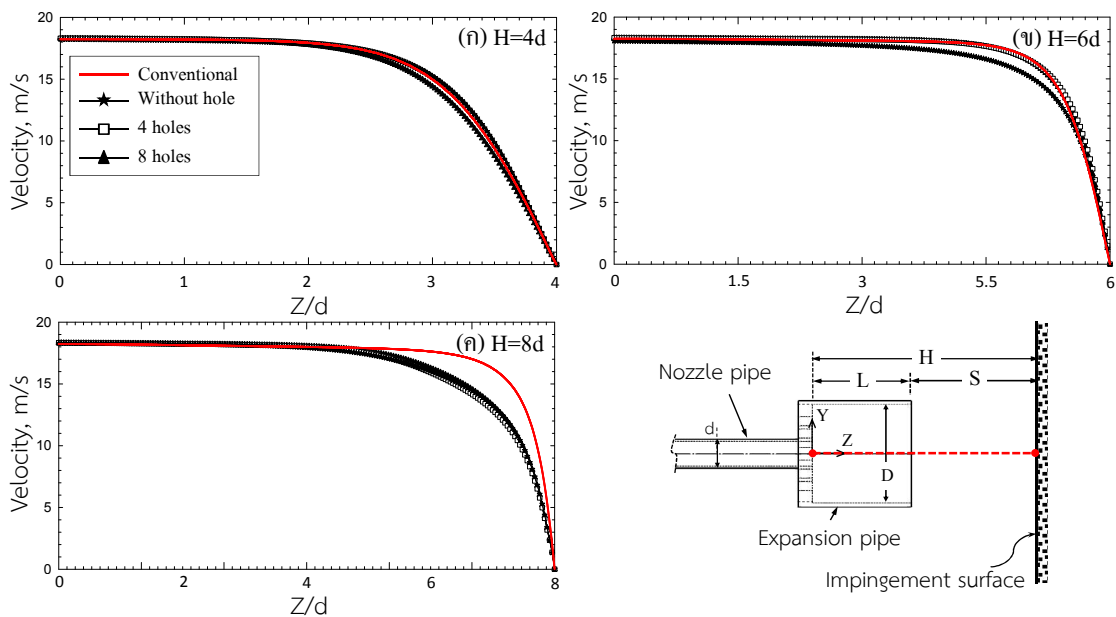
รูปที่ 40 แสดงเส้นทางความเร็ว (Streamlines) ของเจ็ทอากาศบนระนาบ Y-Z ตรงกลางเจ็ทจากผลการจำลองทางพลศาสตร์ของไหล กรณีท่อขยายหน้าตัดที่ความยาวท่อ $L=2d$ และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D=4d$ จากรูปพบว่า เจ็ทที่ไหลออกจากท่อขยายหน้าตัดที่ไม่มีการเจาะรู หนึ่งยวนำอากาศจะมีอากาศรอบๆ เจ็ทเข้ามาผสมภายในท่อขยายหน้าตัดเพิ่มขึ้นแล้วพุ่งชนพื้นผิวทันที ดังแสดงในรูปที่ 40(a), 40(d) และ 40(g) ซึ่งจะแตกต่างจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรู หนึ่งยวนำอากาศแบบ 4 รู (รูปที่ 40(b), 40(e) และ 40(h)) จะมีการดึง (Entrainment) ของอากาศบริเวณด้านหลังท่อขยายหน้าตัดใหญ่เข้ามาผสมกับเจ็ทเพิ่มขึ้น โดยมีการดึงอากาศเข้ามาผสมกับเจ็ทลดลงเมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น สำหรับท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรู หนึ่งยวนำอากาศแบบ 8 รู (รูปที่ 40(c), 40(f) และ 40(i)) อากาศรอบๆ เจ็ททั้งบริเวณด้านหลัง และด้านหน้าของท่อขยายหน้าตัดจะถูกดึงเข้ามาผสมกับเจ็ทภายในท่อขยายหน้าตัดเพิ่มขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรู หนึ่งยวนำอากาศแบบ 4 รู ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เท่ากัน ก่อนเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว การดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับเจ็ทจะเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนภายในเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งมีผลต่อบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทจากท่อปกติ พิจารณาได้จากค่าตัวเลขสีดำนัมเบอร์บริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 38



รูปที่ 40 แสดงเส้นทางความเร็วของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวจากการจำลองลักษณะการไหล (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.1.4 กระจายความเร็วเจ็ทในแนวแกนเจ็ทจากการจำลองลักษณะการไหล

รูปที่ 41 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วในแนวแกนเจ็ท (Z-axis) ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$, $6d$ และ $8d$ ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า ลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศสูงตรงบริเวณปากทางออกเจ็ท และจะค่อยๆ ลดลงตามระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น (รูปที่ 41(ก), 41 (ข) และ 41(ค)) สำหรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ (รูปที่ 41(ก)) พบว่า ลักษณะการกระจายความเร็วในแนวแกนเจ็ท กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศ มีลักษณะการกระจายความเร็วใกล้เคียงกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็น $H=6d$ และ $8d$ (รูปที่ 41(ข) และ 41(ค)) พบว่า กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศ ให้ค่าการกระจายความเร็วในแนวแกนเจ็ทต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ลักษณะการกระจายนี้สเกลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวนั้น มีลักษณะไม่แตกต่างจากกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

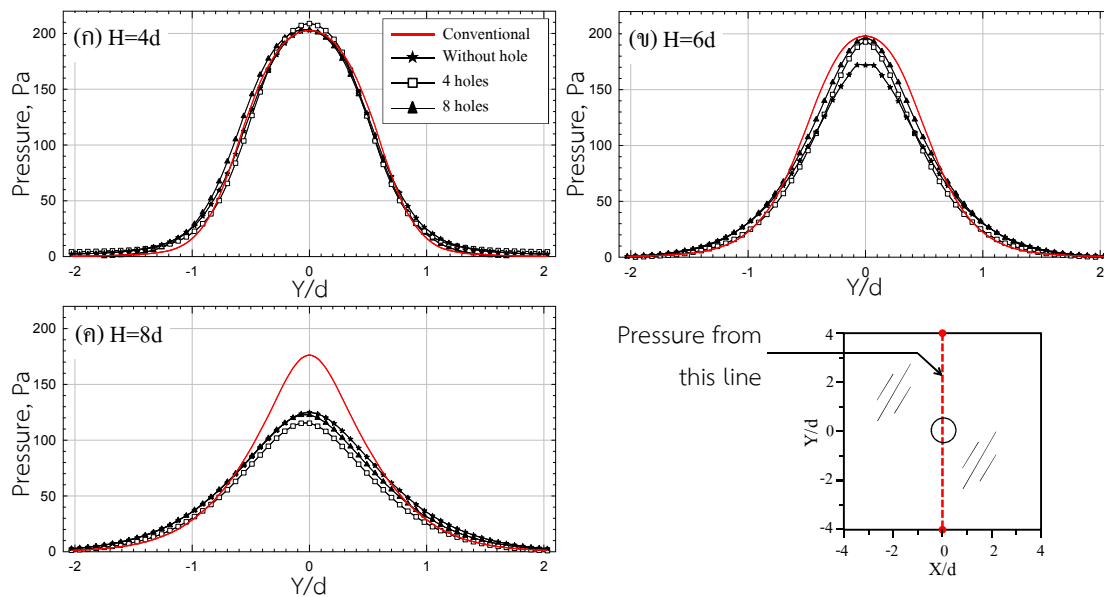


รูปที่ 41 แสดงกระจายความเร็วเจ็ทในแนวแกนเจ็ทจากการจำลองลักษณะการไหล (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.1.5 การกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนจากการจำลองลักษณะการไหล

รูปที่ 42 แสดงลักษณะการกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน ($X/d=0$) ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$, $6d$ และ $8d$ ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า ลักษณะการกระจายความดันบนผนังของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศสูงตรงบริเวณปากทางออกเจ็ท และจะค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ทเพิ่มขึ้น (รูปที่ 42(ก), 42(ข) และ 42(ค)) สำหรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ (รูปที่ 42(ก)) พบว่า

การกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศ มีลักษณะการกระจายความดันใกล้เคียงกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็น $H=6d$ และ $8d$ (รูปที่ 42(ข) และ 42(ค)) พบว่ากรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศ ให้ค่าการกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลักษณะการกระจายนี้สเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิว มีลักษณะไม่แตกต่างจากกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ



รูปที่ 42 แสดงกระจายความดันบนผนังที่เจ็ทพุ่งชนจากการจำลองลักษณะการไหล (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.2 กรณีศึกษาเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนือยวนำอากาศ

5.2.1 ลักษณะการกระจายนี้สเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

รูปที่ 43, 44 และ 45 แสดงลักษณะการกระจายของนี้สเซลล์ต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=2d$, $4d$ และ $6d$ ตามลำดับโดยภาพรวมพบว่า ค่านี้สเซลล์ต์นัมเบอร์มีค่าสูงบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) แล้วค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ท สำหรับบางเงื่อนไขของเจ็ทแบบติดตั้งปลอกท่อ ที่เงื่อนไข $S=2d$ ($H=4d$, $L=2d$) (รูปที่ 43(j)) จะปรากฏบริเวณที่มีค่านี้สเซลล์ต์นัมเบอร์สูงสุด (Peak) อยู่ 2 บริเวณคือ บริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนและห่างออกจากแนวศูนย์กลางตามแนวรัศมี $-2 \leq r/d \leq 2$ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Secondary peak heat transfer” [21], [23] จะให้ค่าการกระจายนี้สเซลล์ต์นัมเบอร์สูงกว่าเมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ สำหรับกรณีของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ที่เงื่อนไขที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $H=4d$, $6d$, $8d$, $10d$ และ $12d$ ตามลำดับ ไม่ปรากฏบริเวณของค่านี้สเซลล์ต์นัมเบอร์สูงสุดอันดับที่ 2 (Secondary peak) โดยค่านี้สเซลล์ต์นัมเบอร์สูงสุดจะปรากฏบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพียงจุดเดียวเท่านั้น

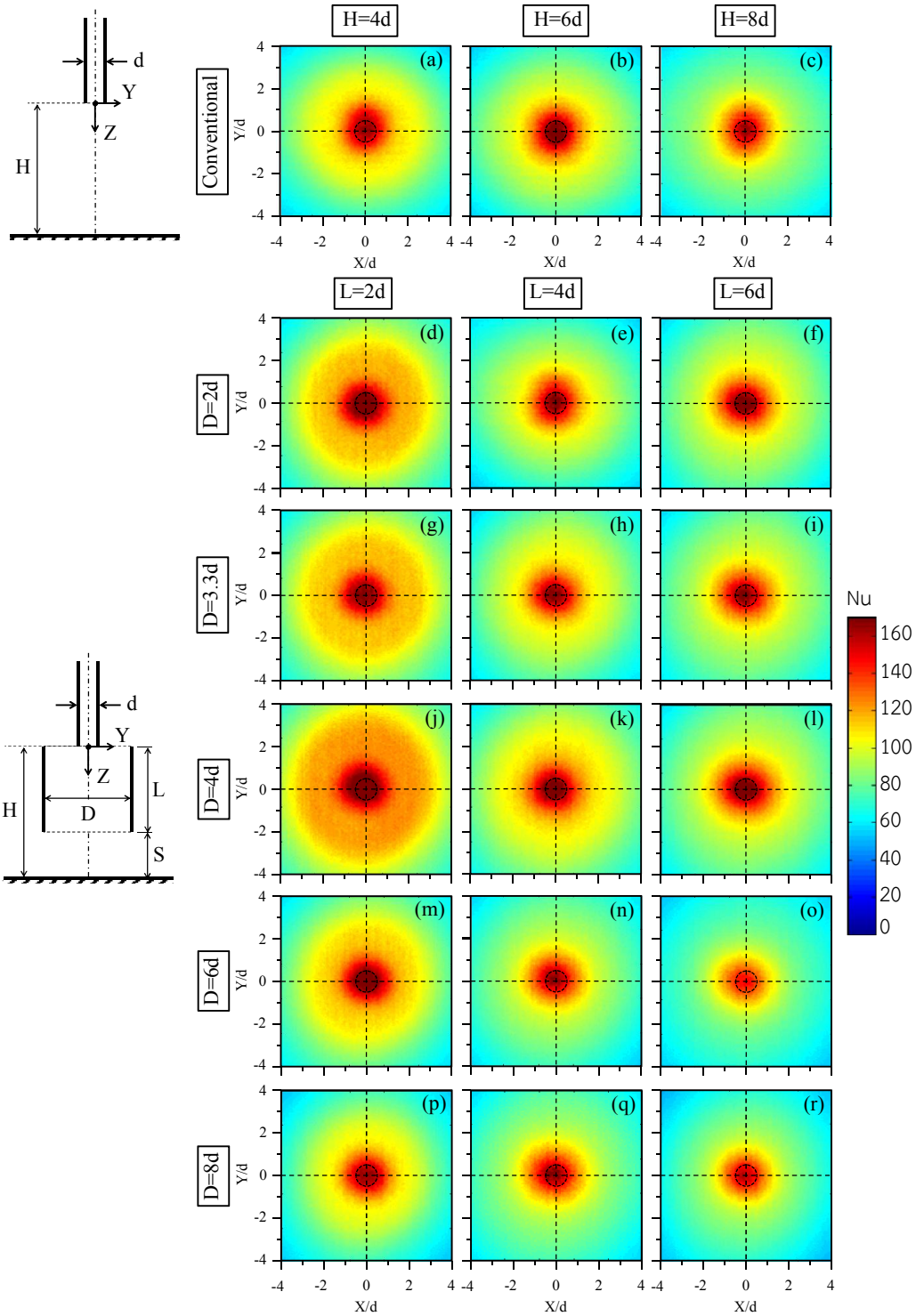
รูปที่ 43 ที่ระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=2d$ ($H=4d, 6d$ และ $8d$) พบว่า ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ ($L=2d$) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d$ และ $6d$ (รูปที่ 43(d), 43(g), 43(j) และ 43(m)) ตามลำดับ ให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ บริเวณในช่วง $-3 \leq r/d \leq 3$ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนโดยเฉพาะบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ในขณะที่กรณีระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ ($L=4d$) ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์ของเจ็ทแบบตีปลอกท่อสูงกว่าเจ็ทจากท่อปกติบางกรณี เช่น กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ (รูปที่ 43(k)) ส่วนที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ ($L=6d$) การกระจายของนัสเชิลต์นัมเบอร์ กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ (รูปที่ 43(f), 43(i) และ 43(l)) ตามลำดับ ให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ จะเห็นได้ชัดเจนอยู่ในช่วง $-1.5 \leq r/d \leq 1.5$ ซึ่งค่าการกระจายนัสเชิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากเจ็ทพุ่งชนแบบตีปลอกท่อ มีการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทมากขึ้น มีความเร็วเจ็ทเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ท

รูปที่ 44 ที่ระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=4d$ ($H=6d, 8d$ และ $10d$) พบว่า ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ ($L=2d$) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$, และ $4d$ (รูปที่ 44(d), 44(g) และ 44(j)) ตามลำดับ ให้ค่าการกระจายนัสเชิลต์นัมเบอร์สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติที่อยู่ในช่วง $-2.5 \leq r/d \leq 2.5$ ในขณะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ ($L=4d$) เส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d$ และ $4d$ (รูปที่ 44(e) และ 44(k)) ให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ส่วนเงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=10d$ ($L=6d$) เจ็ทพุ่งชนแบบตีปลอกท่อ ให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์ใกล้เคียงกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

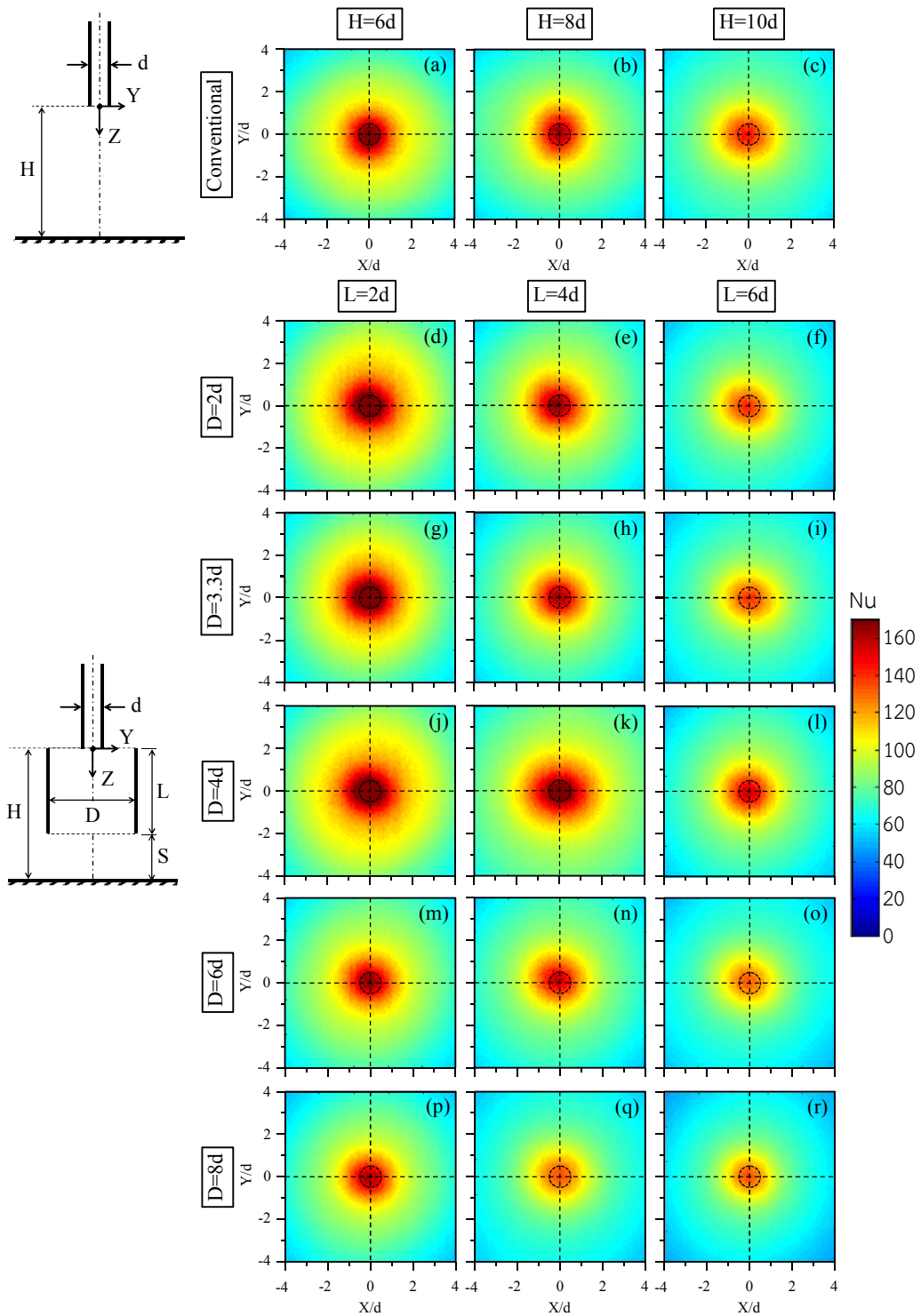
รูปที่ 45 ที่ระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=6d$ ($H=8d, 10d$ และ $12d$) พบว่า ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ ($L=2d$) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$, และ $4d$ (รูปที่ 45(d), 45(g) และ 45(j)) ตามลำดับ จะให้ค่าการกระจายนัสเชิลต์นัมเบอร์สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน อยู่ในช่วง $-2 \leq r/d \leq 2$ ในขณะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=10d$ ($L=4d$) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=3.3d$ (รูปที่ 45(h)) จะให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ส่วนเงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=12d$ ($L=6d$) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $8d$ (รูปที่ 45(f), 45(i) และ 45(r)) ตามลำดับ ให้ค่านัสเชิลต์นัมเบอร์สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ จะเห็นได้ชัดเจนบริเวณในช่วง $-1 \leq r/d \leq 1$

โดยภาพรวมพบว่า ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (S) เส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ (D) และความยาวปลอกท่อ (L) มีผลต่อค่านัสเชิลต์นัมเบอร์ที่สูงขึ้นเนื่องจากเจ็ทพุ่งชนแบบตีปลอกท่อ สามารถดึงอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทมากขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของลำเจ็ทเพิ่มสูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ สร้างความปั่นป่วนภายในปลอกท่อ ให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่

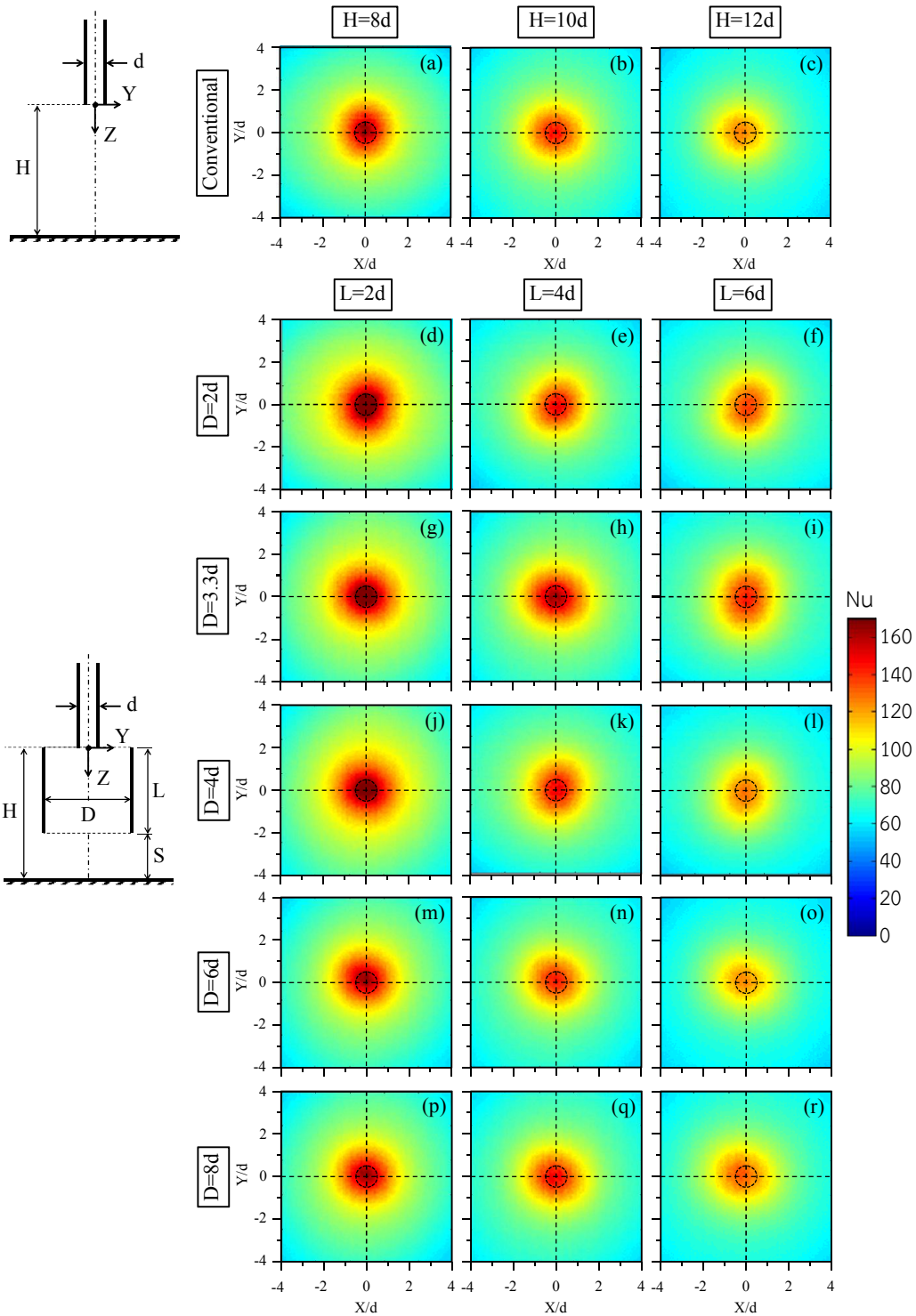
เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางปลอกท่อ $D=4d$ และความยาวของปลอกท่อ $L=2d$ ให้ค่านี้สเกลต์นัมเบอร์สูงสุด ซึ่งจะอธิบายลักษณะการไหลอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 43 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



รูปที่ 44 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน
ที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



รูปที่ 45 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน
ที่เงื่อนไขระยะ $S=6d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

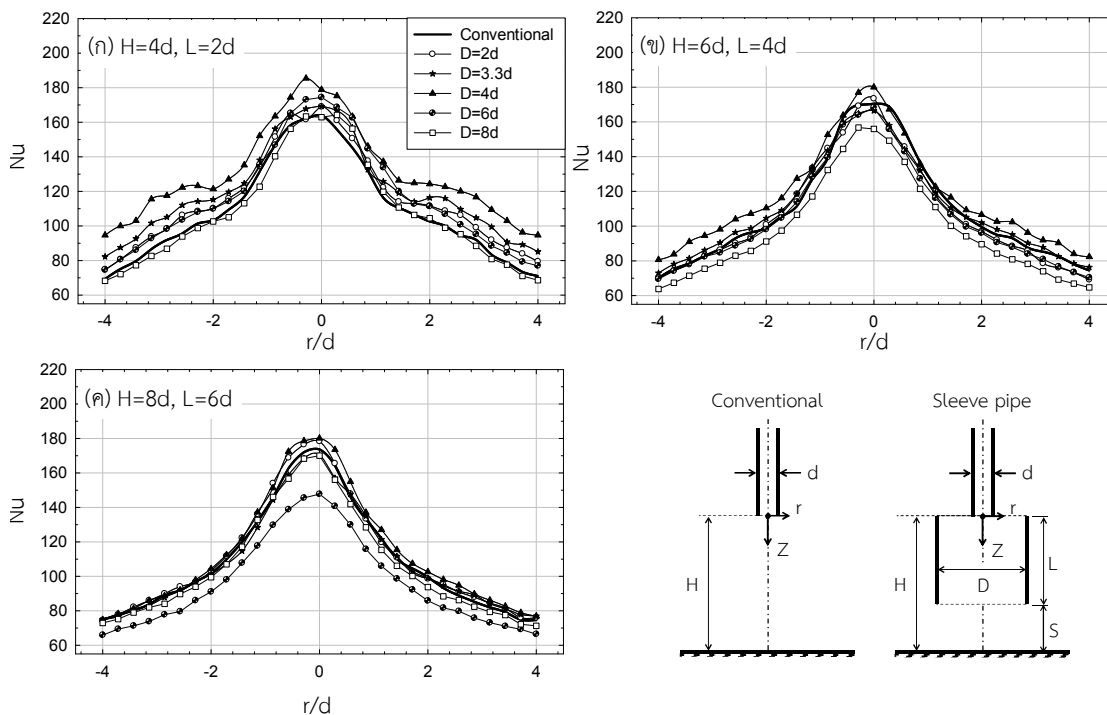
5.2.2 ลักษณะการกระจายน้สเซลล์น้มเบอร์บนพื้นผิวผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่ง

ชน

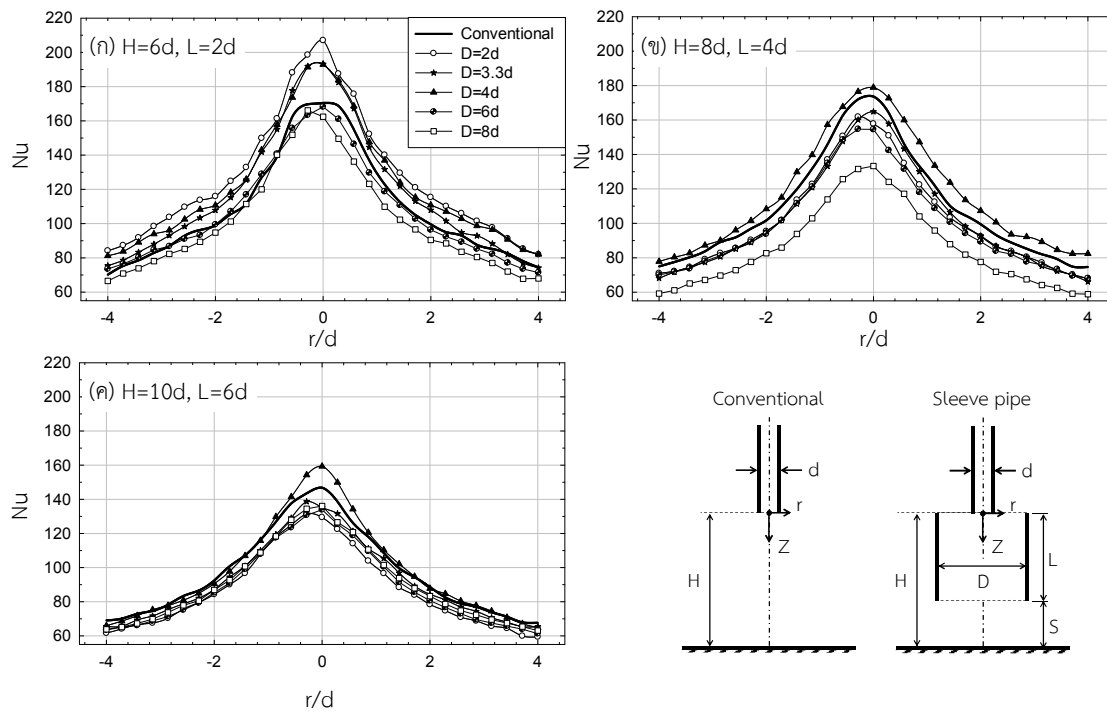
รูปที่ 46, 47, และ 48 แสดงลักษณะการกระจายน้สเซลล์น้มเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่งชน ที่เงื่อนไชระยะจากปากทางออกปลอกท่ถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟ่งชน $S=2d$, $4d$ และ $6d$ ตามลำดับ โดยภาพรวมพบว่า ลักษณะการกระจายน้สเซลล์น้มเบอร์มีค่าสูงสุดบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่งชน และลดลงตามแนวรัศมีของเจ้ท ในขณะทีระยะจากปากทางออกของเจ้ทถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟ่งชน (H) และความยาวปลอกท่ (L) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการกระจายน้สเซลล์น้มเบอร์ลดลง แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของน้สเซลล์น้มเบอร์ลำดับที่สอง (Secondary peak) เกิดขึ้นทีเงื่อนไชระยะจากปากทางออกของเจ้ทถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟ่งชน $H=4d$ (ความยาวปลอกท่ $L=2d$) เพียงกรณีเดียว ซึ่งค่าการกระจายน้สเซลล์น้มเบอร์สูงขึ้น เป็นผลมาจากเจ้ทฟ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่มีการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ้ทมากขึ้น ทำให้ความเร็วเจ้ทเพิ่มขึ้น

รูปที่ 46 กรณีทีเงื่อนไชระยะจากปากทางออกปลอกท่ถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟ่งชน $S=2d$ ($H=4d$, $6d$ และ $8d$) จากผลการศึกษาขนาดความยาวปลอกท่ $L=2d$ (รูปที่ 46(ก)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่งชน (Stagnation point) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=2d$, $3.3d$, $4d$ และ $6d$ สามารถให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์สูงกว่า 3.08%, 3.18%, 13.07% และ 6.37% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=8d$ ให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์สูงกว่าเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติเล็กน้อย สำหรับขนาดความยาวปลอกท่ $L=4d$ (รูปที่ 46(ข)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่งชน กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=2d$ และ $D=4d$ ให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์สูงกว่า 1.70% และ 5.56% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ ส่วนกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=2d$, $3.3d$ และ $6d$ ให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์ใกล้เคียงกับเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ และเมื่อเพิ่มความยาวปลอกท่ $L=6d$ (รูปที่ 46(ค)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่งชน กรณีทีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=2d$ และ $4d$ สามารถให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์สูงกว่า 2.70% และ 3.73% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=3.3d$, $6d$ และ $8d$ ให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์ต่ำกว่าเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ

รูปที่ 47 กรณีทีเงื่อนไชระยะจากปากทางออกปลอกท่ถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟ่งชน $S=4d$ ($H=6d$, $8d$ และ $10d$) จากผลการศึกษาขนาดความยาวปลอกท่ $L=2d$ (รูปที่ 47(ก)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่งชน กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=2d$, $3.3d$ และ $4d$ สามารถให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์สูงกว่า 21.42%, 13.31% และ 13.15% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ เมื่อเพิ่มระยะความยาวปลอกท่ $L=4d$ และ $6d$ (รูปที่ 47(ข) และ 47(ค)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ้ทฟ่งชน กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=4d$ เท่านั้น สามารถให้ค่าน้สเซลล์น้มเบอร์สูงกว่า 3.01% และ 8.52% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่ $D=2d$, $3.3d$, $6d$ และ $8d$ ไม่สามารถช่วยเพิ่มค่าน้สเซลล์น้มเบอร์ให้สูงกว่าเจ้ทฟ่งชนแบบท่ปกติ

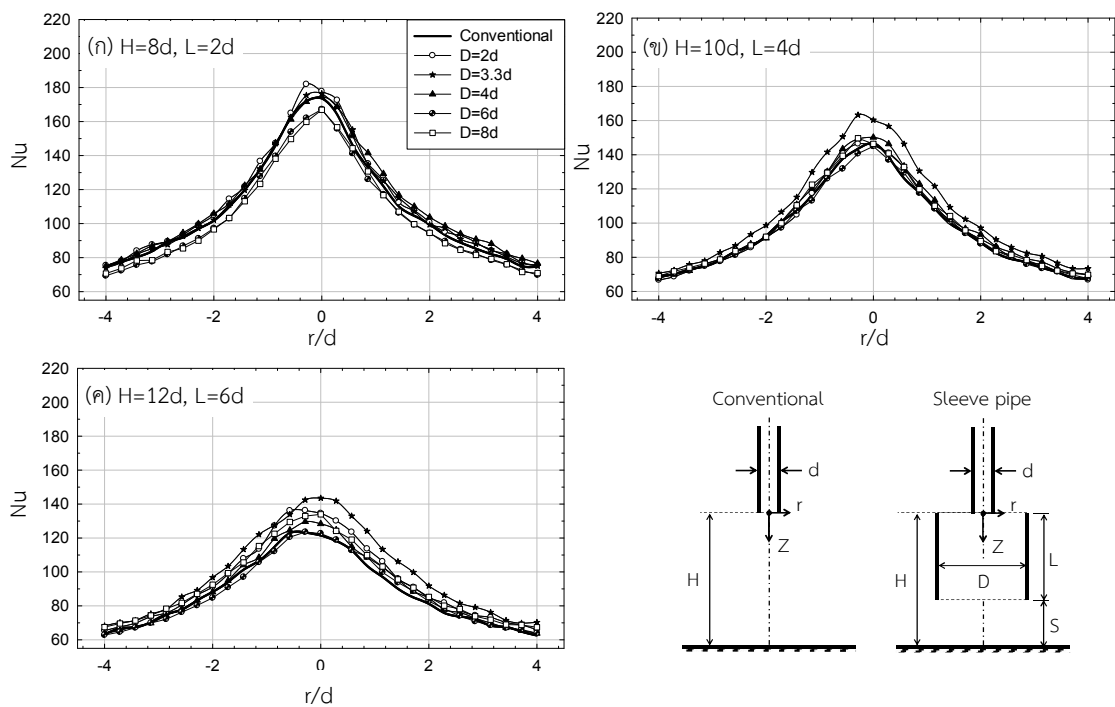


รูปที่ 46 แสดงลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



รูปที่ 47 แสดงลักษณะการกระจายนัสเซิลต์นัมเบอร์บนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

รูปที่ 48 กรณีที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=6d$ ($H=8d, 10d$ และ $12d$) จากผลการศึกษาขนาดความยาวปลอกท่อ $L=2d$ (รูปที่ 48(ก)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 4.78%, 1.61% และ 0.58% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=6d$ และ $8d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนไม่แตกต่างจากเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ แต่เมื่อทำการเพิ่มระยะความยาวปลอกท่อ $L=4d$ (รูปที่ 48(ข)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทแบบติดปลอกท่อ $D=3.3d, 4d$ และ $6d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 11.25%, 2.31% และ 1.96% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ สำหรับที่เงื่อนไขความยาวปลอกท่อเพิ่มเป็น $L=6d$ (รูปที่ 48(ค)) พบว่า ในบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d, 6d$ และ $8d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 10.48%, 16.37%, 5.14%, 0.18% และ 8.61% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนเป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำอากาศของเจ็ทแบบติดปลอกท่อเพิ่มขึ้น ช่วยสร้างความปั่นป่วนภายในปลอกท่อ และเพิ่มความเร็วเจ็ทที่สูงขึ้น

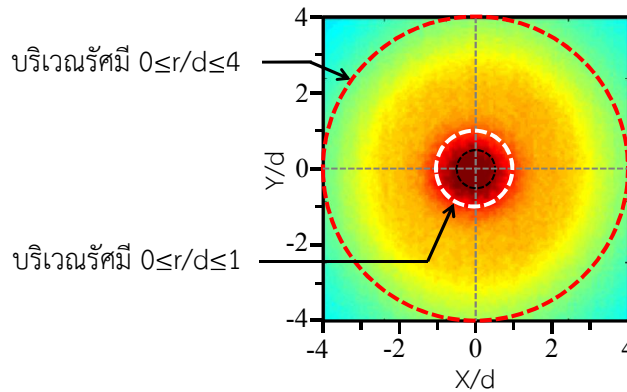


รูปที่ 48 แสดงลักษณะการกระจายสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่ผ่านจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ที่เงื่อนไขระยะ $S=6d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.2.3 ลักษณะการกระจายน้ำเสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน

ในการหาค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน ได้ทำการหาค่าอณหภูมิเฉลี่ยที่กระจายบนพื้นผิวในช่วง $0 \leq r/d \leq 1$ และ $0 \leq r/d \leq 4$

รูปที่ 49 แสดงค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 1$ และ $0 \leq r/d \leq 4$ ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกทอถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน $S=2d$ ($H=4d, 6d$ และ $8d$) จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะจากปากทางออกเจ้ทถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน (H) เพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยจะลดลง ซึ่งโดยภาพรวมเห็นได้ชัดว่า เจ้ทฟุงชนแบบติดตั้งปลอกทอที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=4d$ (รูปที่ 49(ก) และ 49(ข) สามารถให้ค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวตามแนวรัศมี (r/d) สูงกว่าเจ้ทฟุงชนแบบทอปกติ และเจ้ทฟุงชนแบบติดตั้งปลอกทอกรณีอื่นๆ



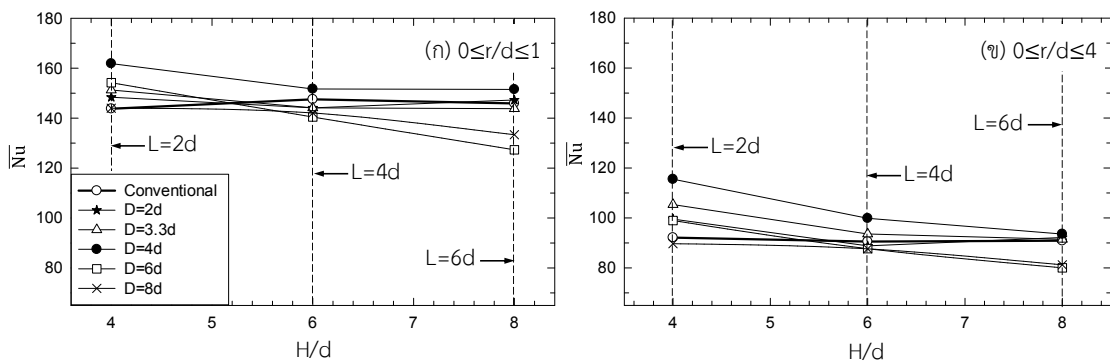
รูปที่ 49 แสดงบริเวณช่วงรัศมีที่ใช้ในการหาค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิว

สำหรับค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 1$ (รูปที่ 50(ก)) ที่ระยะจากปากทางออกเจ้ทถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน $H=4d$ (ความยาวปลอกทอ $L=2d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกทอ $D=2d, 3.3d, 4d$ และ $6d$ ให้ค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยสูงกว่า 3.22%, 5.24%, 12.59% และ 7.26% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟุงชนแบบทอปกติ ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกทอ $D=8d$ ให้ค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อยเพียง 0.14% เมื่อเทียบกับเจ้ทฟุงชนแบบทอปกติ สำหรับเงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ้ทถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน $H=6d$ (ความยาวปลอกทอ $L=4d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกทอ $D=4d$ เพียงกรณีเดียว ที่ให้ค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยสูงกว่า 2.82% เมื่อเทียบกับเจ้ทฟุงชนแบบทอปกติ แต่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ้ทถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน $H=8d$ (ความยาวปลอกทอ $L=6d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกทอ $D=2d$ และ $4d$ ให้ค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยสูงกว่า 0.95% และ 3.85% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟุงชนแบบทอปกติ

สำหรับค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 4$ (รูปที่ 50(ข)) ที่ระยะจากปากทางออกเจ้ทถึงพื้นผิวที่เจ้ทฟุงชน $H=4d$ (ความยาวปลอกทอ $L=2d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกทอ $D=2d, 3.3d, 4d$ และ $6d$ ให้ค่าน้เสียดัน้เบอ์เฉลี่ยสูงกว่า 8.05%, 14.38%, 25.42% และ 7.44% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ้ทฟุงชนแบบทอปกติ ในขณะที่

กรณีระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=4d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=3.3d$ และ $4d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 3.36% และ 10.31% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=6d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่าเพียงเล็กน้อย 1.41%, 0.62% และ 2.92% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนท่อปกติ

โดยภาพรวมพบว่า การกระจายสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 1$ และ $0 \leq r/d \leq 4$ (รูปที่ 50(ก) และ 50(ข)) ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=2d$ สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์แนวโน้มนำเดียวกัน ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) เท่านั้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ สำหรับทุกเงื่อนไข ยกเว้นกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=8d$



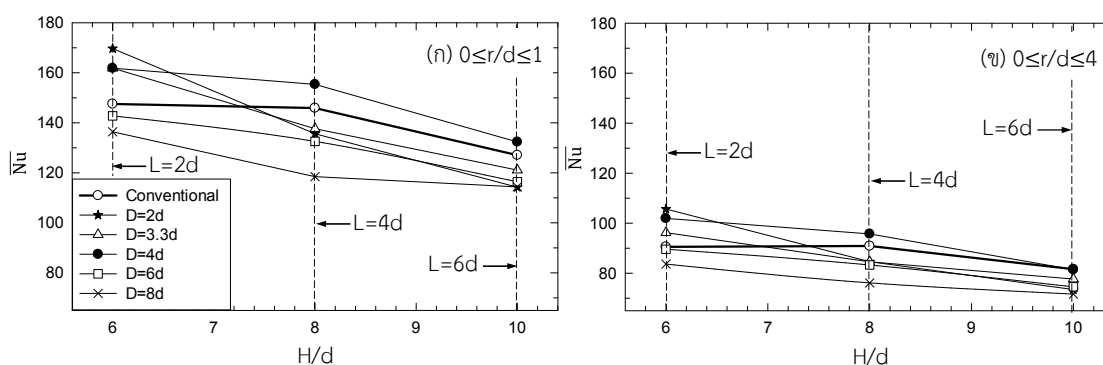
รูปที่ 50 แสดงค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

รูปที่ 51 แสดงค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 1$ และ $0 \leq r/d \leq 4$ ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=4d$ ($H=6d, 8d$ และ $10d$) จากผลการศึกษาคณิศเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อพบว่า เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยจะลดลง ซึ่งโดยภาพรวมเห็นได้ชัดเจนว่า กรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ (รูปที่ 51(ก) และ 51(ข)) สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวตามแนวรัศมี (r/d) สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ และเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อกรณีอื่นๆ ยกเว้นที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d$ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 1$ (รูปที่ 51(ก)) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 15.04%, 9.71% และ 10.39% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=4d$) และ $10d$ (ความยาวปลอกท่อ

$L=6d$) พบว่า กรณีสั้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ เพียงกรณีเดียว ที่ให้ค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 6.49% และ 4.15% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

สำหรับค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 4$ (รูปที่ 51(ข)) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) พบว่า กรณีสั้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ ให้ค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 16.72%, 6.28% และ 12.60% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=4d$) พบว่า กรณีสั้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ เพียงกรณีเดียว ที่ให้ค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 5.31% เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ แต่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=10d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=6d$) พบว่า กรณีสั้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อทุกกรณีให้ค่า Nusselt นัมเบอร์ต่ำกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ซึ่งอาจเกิดจากความปั่นป่วนที่ลดลง เนื่องจากความยาวปลอกท่อเพิ่มขึ้น (L) การถ่ายเทความร้อนจึงเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) เท่านั้น



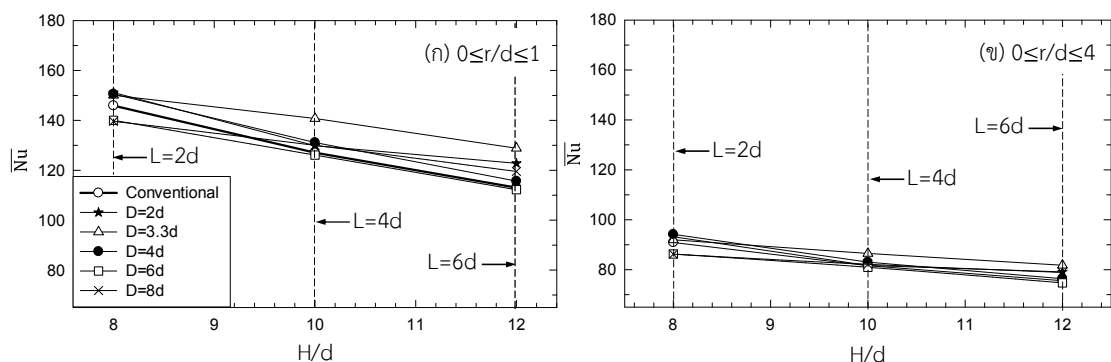
รูปที่ 51 แสดงค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

รูปที่ 52 แสดงค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 1$ และ $0 \leq r/d \leq 4$ ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=6d$ ($H=8d, 10d$ และ $12d$) จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น แนวโน้มของ Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยลดลง ซึ่งโดยภาพรวมเห็นได้ชัดเจน ที่เงื่อนไขสั้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทแบบตีปลอกท่อ $D=3.3d$ (รูปที่ 52(ก) และ 52(ข)) สามารถให้ค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวตามแนวรัศมี (r/d) สูงกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

สำหรับค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 1$ (รูปที่ 52(ก)) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) พบว่า กรณีสั้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ ให้ค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 3.60%, 2.86% และ 3.19% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ สำหรับเงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=10$ (ความยาวปลอกท่อ $L=4d$) พบว่า กรณีสั้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d$ และ $8d$ ให้ค่า Nusselt นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 2.19%, 10.76%, 3.18%

และ 2.29% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ส่วนที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=12d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=6d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d$ และ $8d$ ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงกว่า 8.64%, 13.99%, 2.33% และ 5.75% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

สำหรับค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนในช่วงรัศมี $0 \leq r/d \leq 4$ (รูปที่ 52(ข)) ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงกว่า 2.56%, 1.20% และ 3.61% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=10$ (ความยาวปลอกท่อ $L=4d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d$ และ $8d$ ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อยเพียง 0.12%, 6.02%, 1.76% และ 0.68% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ยกเว้นกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=3.3d$ ส่วนที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=12$ (ความยาวปลอกท่อ $L=6d$) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d$ และ $8d$ ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงกว่า 4.69%, 8.20%, 1.04% และ 4.37% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ซึ่งเห็นได้ชัดว่า ระยะความยาวปลอกท่อ (L) เพิ่มขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ (D) ลดลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

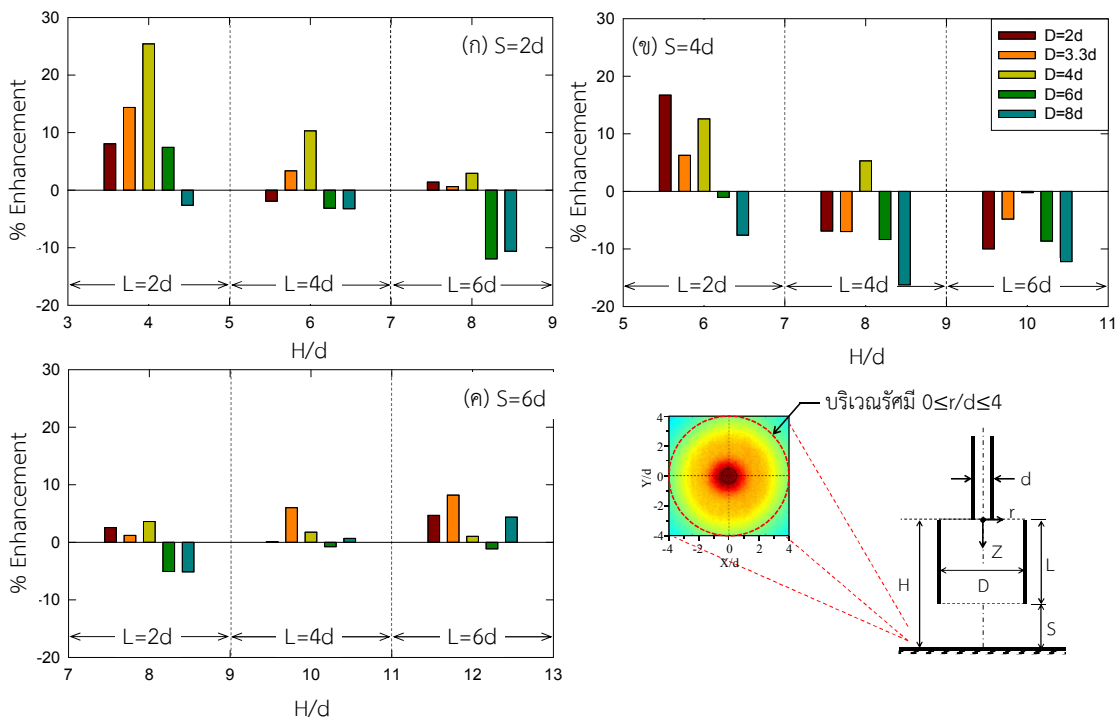


รูปที่ 52 แสดงค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เงื่อนไขระยะ $S=6d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

รูปที่ 53 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตามแนวรัศมีของเจ็ท $0 \leq r/d \leq 4$ เทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ โดยภาพรวมพบว่า ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเฉลี่ยลดลง เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=2d$ ($H=4d, 6d$ และ $8d$) ดังแสดงในรูปที่ 53(ก) พบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ เท่านั้น สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเฉลี่ย (Percent Enhancement) สูง

กว่า 25.42% เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่ระยะความยาวปลอกท่อ (L) ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้สเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยลดลง

สำหรับเงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=4d$ ($H=6d, 8d$ และ $10d$) ดังแสดงในรูปที่ 53(ข) พบว่า เฉพาะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=6d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) และเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d$ เท่านั้น ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้สเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 16.72% เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ แต่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น เจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อ ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้สเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ย ยกเว้นที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=8d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=4d$) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้สเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 5.31% เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=6d$ ($H=8d, 10d$ และ $12d$) (รูปที่ 53(ค)) พบว่า กรณีระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=12d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=6d$) และที่ระยะความยาวของเจ็ทแบบติดตั้งปลอกท่อ (L) เพิ่มขึ้น ที่เงื่อนไขเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=3.3d$ สามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้สเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่า 8.20% เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ เกิดจากเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อ มีการเหนี่ยวนำอากาศจากด้านหลังเข้ามาผสมกับลำเจ็ทมากขึ้น ทำให้มีความเร็วเจ็ทสูง หรือส่วนปลายของบริเวณโพ텐เชียลคอร์ (Potential core) มีระยะตามแนวแกน Z ยาวกว่าเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น



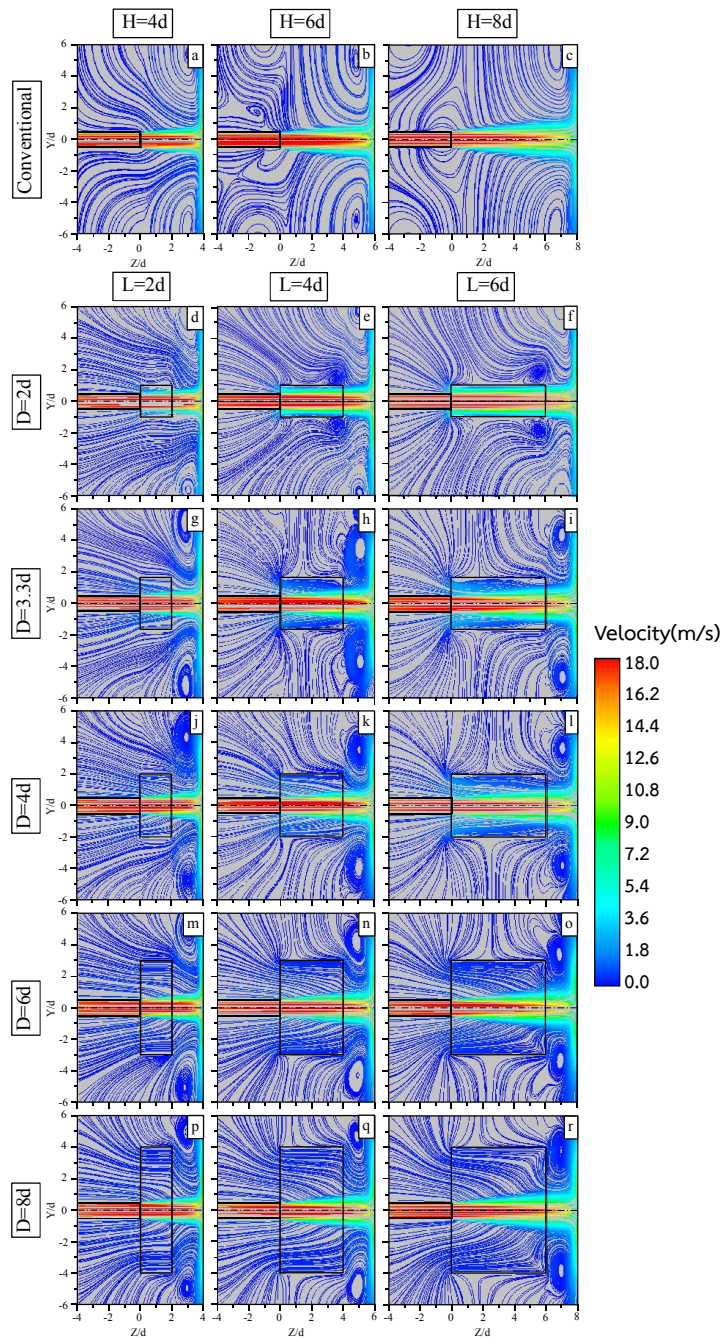
รูปที่ 53 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้สเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อ เทียบกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.2.4 เส้นทางความเร็วจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว

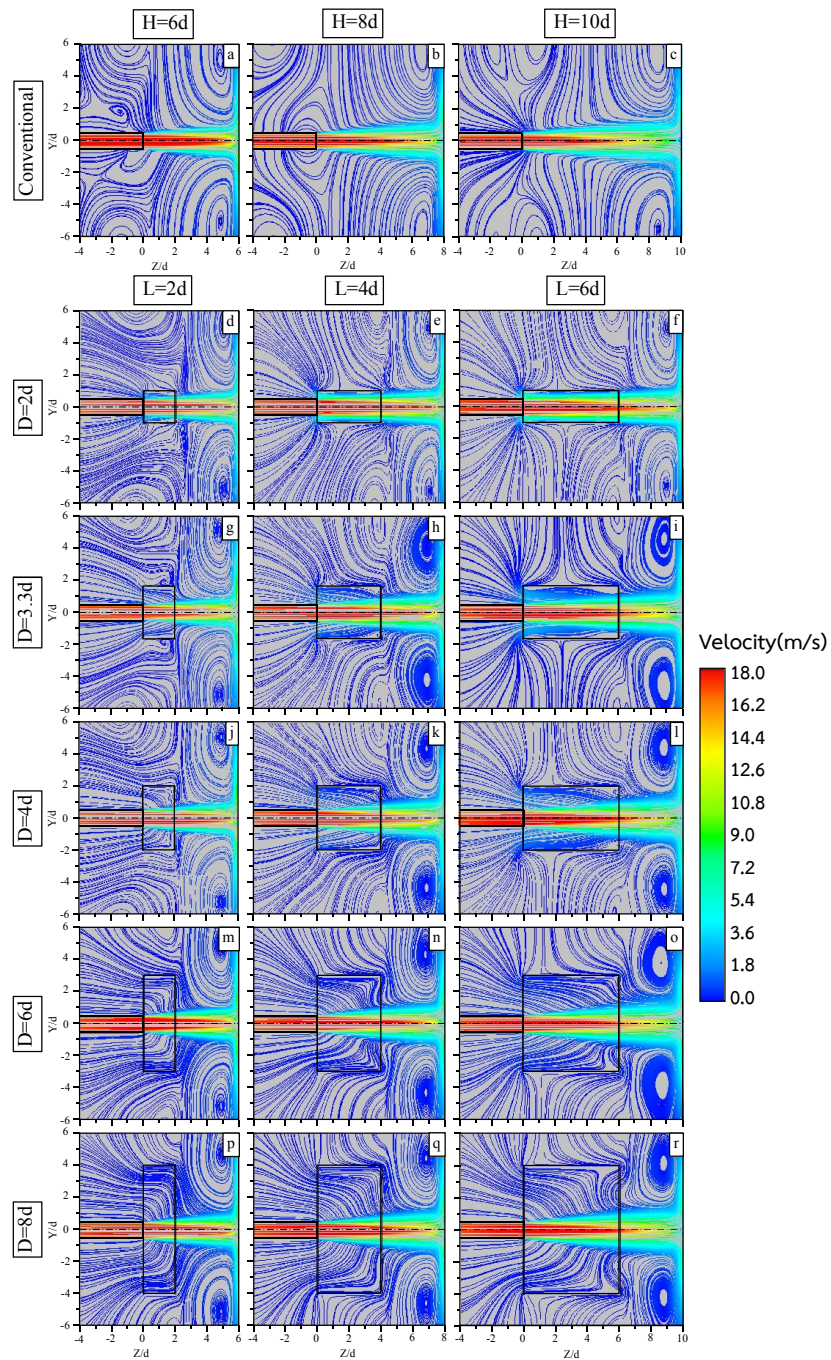
รูปที่ 54 แสดงเส้นทางความเร็ว (Streamline) จากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ และกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d, 6d$ และ $8d$ ระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=2d$ ($H=4d, 6d$ และ $8d$) จากผลการศึกษาพบว่า ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ ความยาวปลอกท่อ $L=2d$ (รูปที่ 54(a), 54(d), 54(g), 54(j), 54(m) และ 54(p)) ในกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ไหลออกจากท่อเจ็ทจะพุ่งออกไป และมีการตั้งอากาศรอบๆ เข้ามาผสมกับลำเจ็ทแล้วพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดปลอกท่อ อากาศรอบๆ ลำเจ็ทจะถูกดึง (Entrainment) เข้ามาจากด้านหลังผสมกับลำเจ็ทภายในปลอกท่อก่อน แล้วพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งการตั้งอากาศรอบๆ เข้ามาผสมกับเจ็ทจะเป็นการเพิ่มความเร็ว และความปั่นป่วนภายในเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว ทำให้ส่วนของบริเวณโพเทินเซียลคอร์มีระยะตามแนวแกน Z และมีความยาวกว่ากรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ มีผลต่อบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในกรณีที่เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, D=3.3d$ และ $4d$ ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ชัดว่าเจ็ทแบบติดปลอกท่อ สามารถตั้งอากาศจากด้านหลัง และอากาศที่อยู่รอบๆ ลำเจ็ทเข้ามาผสมภายในปลอกท่อมากขึ้นส่งผลต่อความเร็ว และความปั่นป่วนภายในเจ็ทสูงขึ้น ทำให้จุดศูนย์กลางบริเวณที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=6d$ และ $8d$ มีการตั้งอากาศเข้ามาผสมมากขึ้น แต่ลักษณะการตั้งอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทยังมีความเร็วที่ต่ำกว่ากรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดปลอกท่อกรณีอื่นๆ จึงไม่มีผลต่อความปั่นป่วนของเจ็ทมากนัก ทำให้ไม่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดี สำหรับที่เงื่อนไขระยะความยาวปลอกท่อ (L) เพิ่มขึ้น โดยภาพรวมพบว่า กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, D=3.3d$ และ $4d$ ตามลำดับ สามารถตั้งอากาศรอบๆ เข้ามาผสมกับลำเจ็ทมากขึ้น แล้วพุ่งชนพื้นผิวทันที ซึ่งบริเวณผนังที่เจ็ทพุ่งชนจะเกิดการหมุนวนขึ้นมากกว่ากรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=6d$ และ $8d$ จะมีอากาศส่วนหนึ่งไหลย้อนกลับเข้าไปในปลอกท่อซึ่งเป็นผลทำให้ความเร็วตามแนวแกนเจ็ทไม่แตกต่างจากกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติมากนัก

รูปที่ 55 และ 56 แสดงเส้นทางความเร็วจากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ และกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดปลอกท่อ ที่เงื่อนไขเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d, 6d$ และ $8d$ ระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=4d$ ($H=6d, 8d$ และ $10d$) และระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=6d$ ($H=8d, 10d$ และ $12d$) จากผลการศึกษาพบว่า กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ลักษณะการไหลของเจ็ทที่ไหลออกจากท่อเจ็ทมีการตั้งอากาศรอบๆ เข้ามาผสมกับลำเจ็ท และจะพุ่งชนพื้นผิวทันที ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดปลอกท่อ กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ อากาศรอบๆ ลำเจ็ทจะถูกดึง เข้ามาจากด้านหลัง และด้านหน้าบางส่วนผสมกับเจ็ทภายในปลอกท่อ ก่อน แล้วพุ่งชนพื้นผิวทันที ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ในขณะที่กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อเพิ่มขึ้น $D=6d$ และ $8d$ สังเกตเห็นได้ชัดว่ามีการไหลย้อนกลับเข้าไปในปลอกท่อเพิ่มขึ้นตามความยาวปลอกท่อเพิ่มขึ้น $L=4d$ และ $6d$ ส่งผลต่อการ

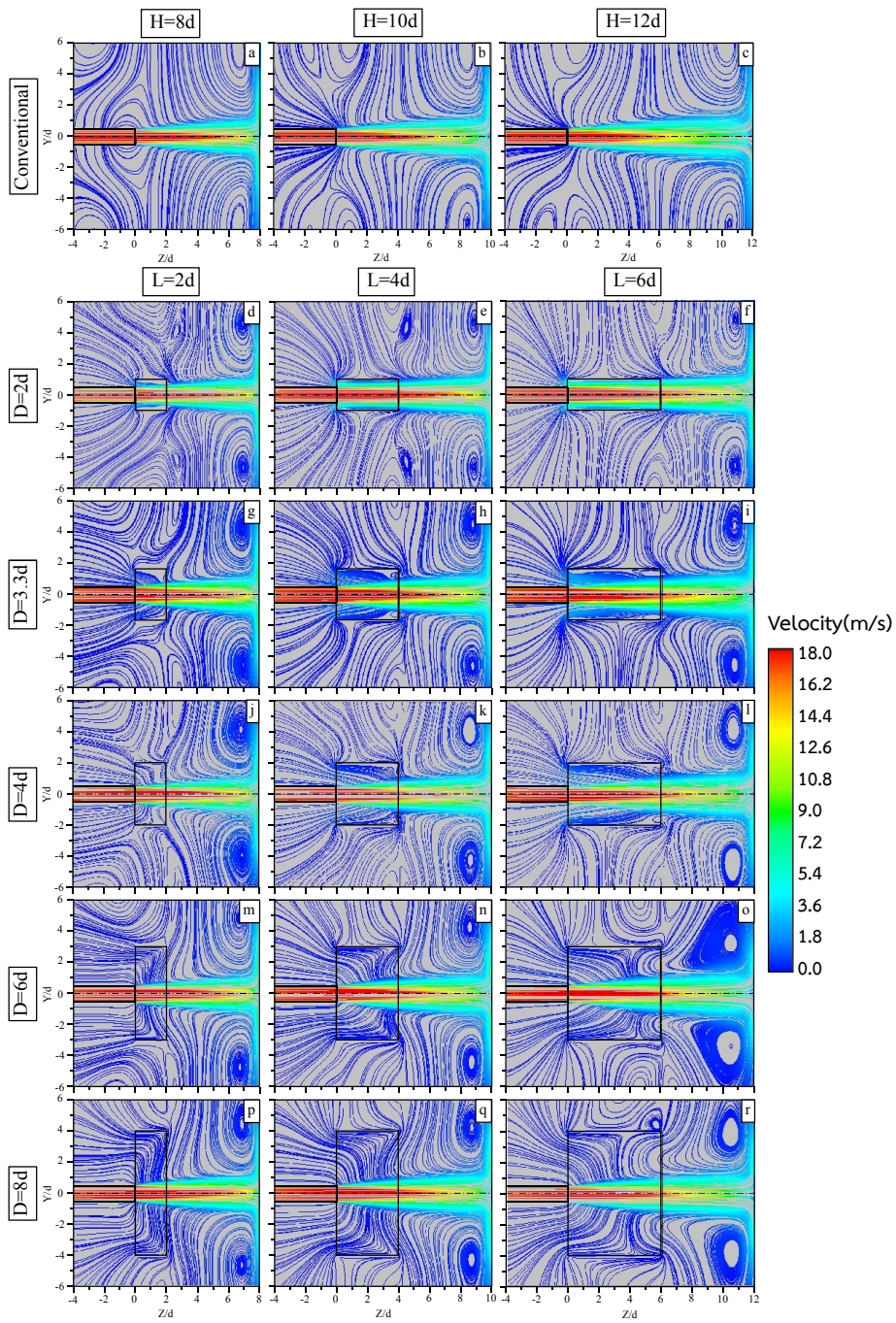
ถ่ายเทความร้อนที่น้อยลง เนื่องจากบริเวณส่วนปลายของโพเทินเซียลคอร์สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขความยาวปลอกท่อ $L=2d$ นอกจากนี้ ผลจากระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น เมื่อลำเจ็ทพุ่งชนพื้นผิวทำให้เกิดการหมุนวนบริเวณแผ่นพุ่งชนมีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นตามเกิดการไหลย้อนกลับเข้ามาภายในปลอกท่อเพิ่มขึ้น โดยสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับเงื่อนไขที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) ต่ำๆ



รูปที่ 54 แสดงเส้นทางการไหล (Streamline) จากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวที่เงื่อนไขระยะ $S=2d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



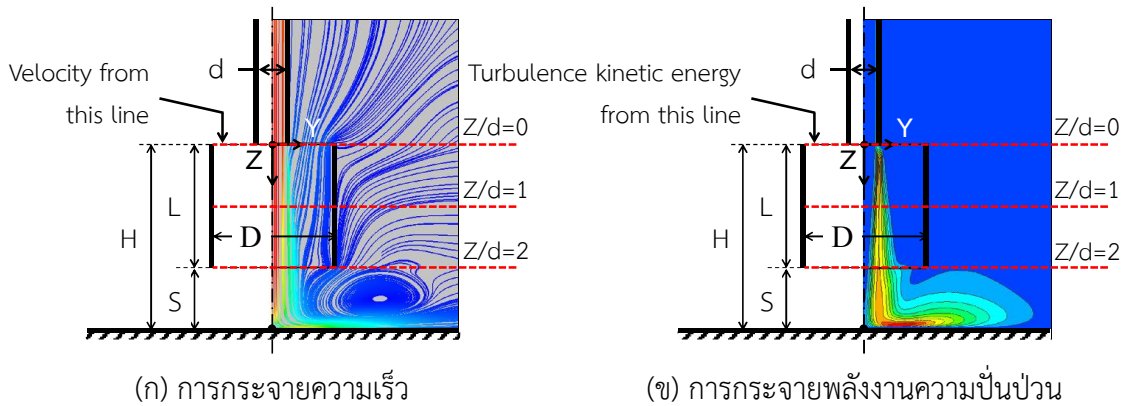
รูปที่ 55 แสดงเส้นทางความเร็ว (Streamline) จากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว ที่เงื่อนไขระยะ $S=4d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



รูปที่ 56 แสดงเส้นทางการไหล (Streamline) จากการจำลองลักษณะการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว ที่เงื่อนไขระยะ $S=6d$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.2.5 การกระจายความเร็วและพลังงานความปั่นป่วนในหน้าตัดเจ็ท

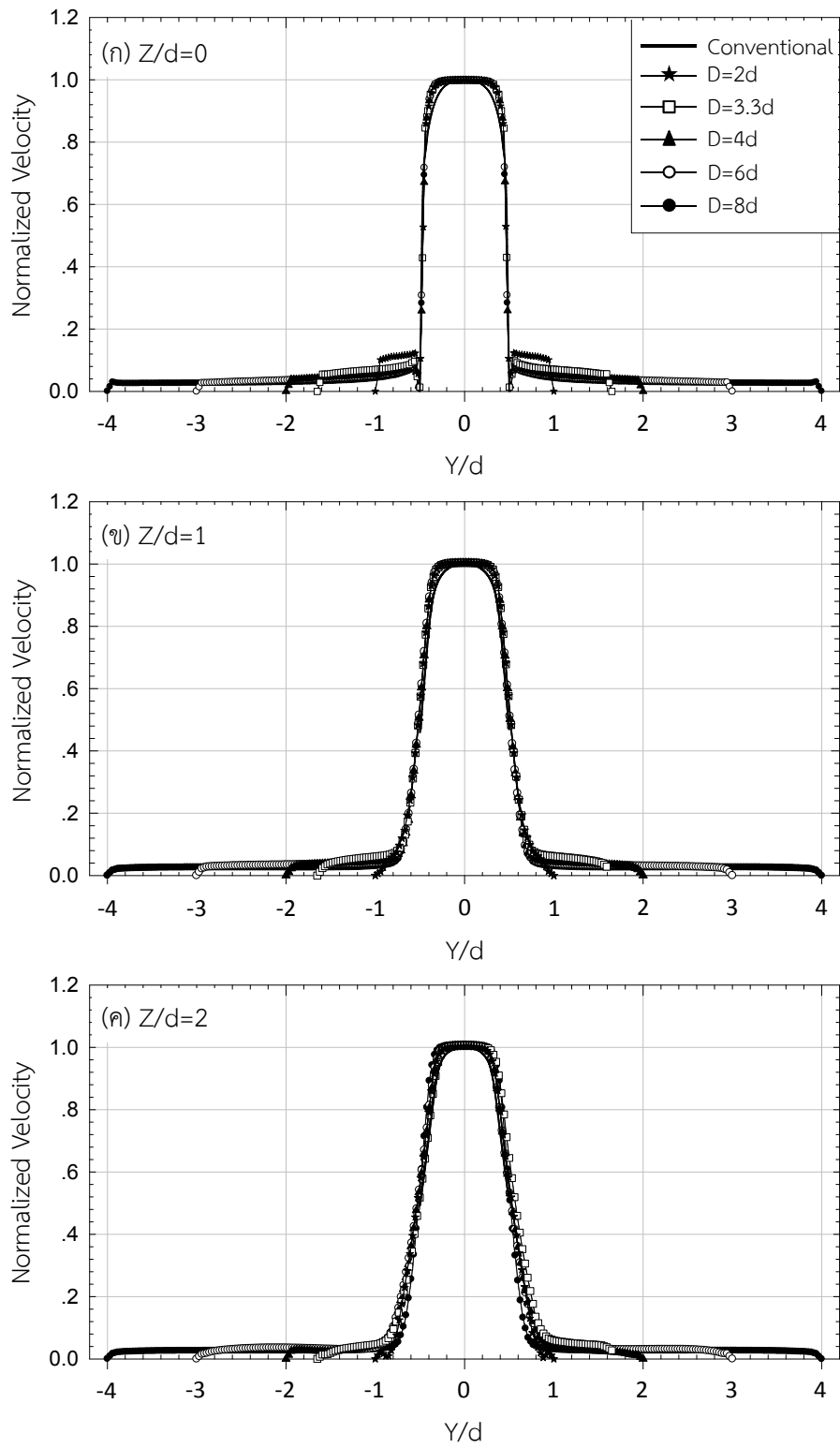
การกระจายความเร็วและพลังงานความปั่นป่วนในหน้าตัดเจ็ท จากผลการจำลองการไหลที่ตัดผ่านแนวศูนย์กลางท่อเจ็ทที่ตำแหน่ง $Z/d=0, 1$ และ 2 (ตามแนวเส้นประ ดังแสดงในรูปที่ 57) แสดงในรูปที่ 58 และ 59 ตามลำดับ



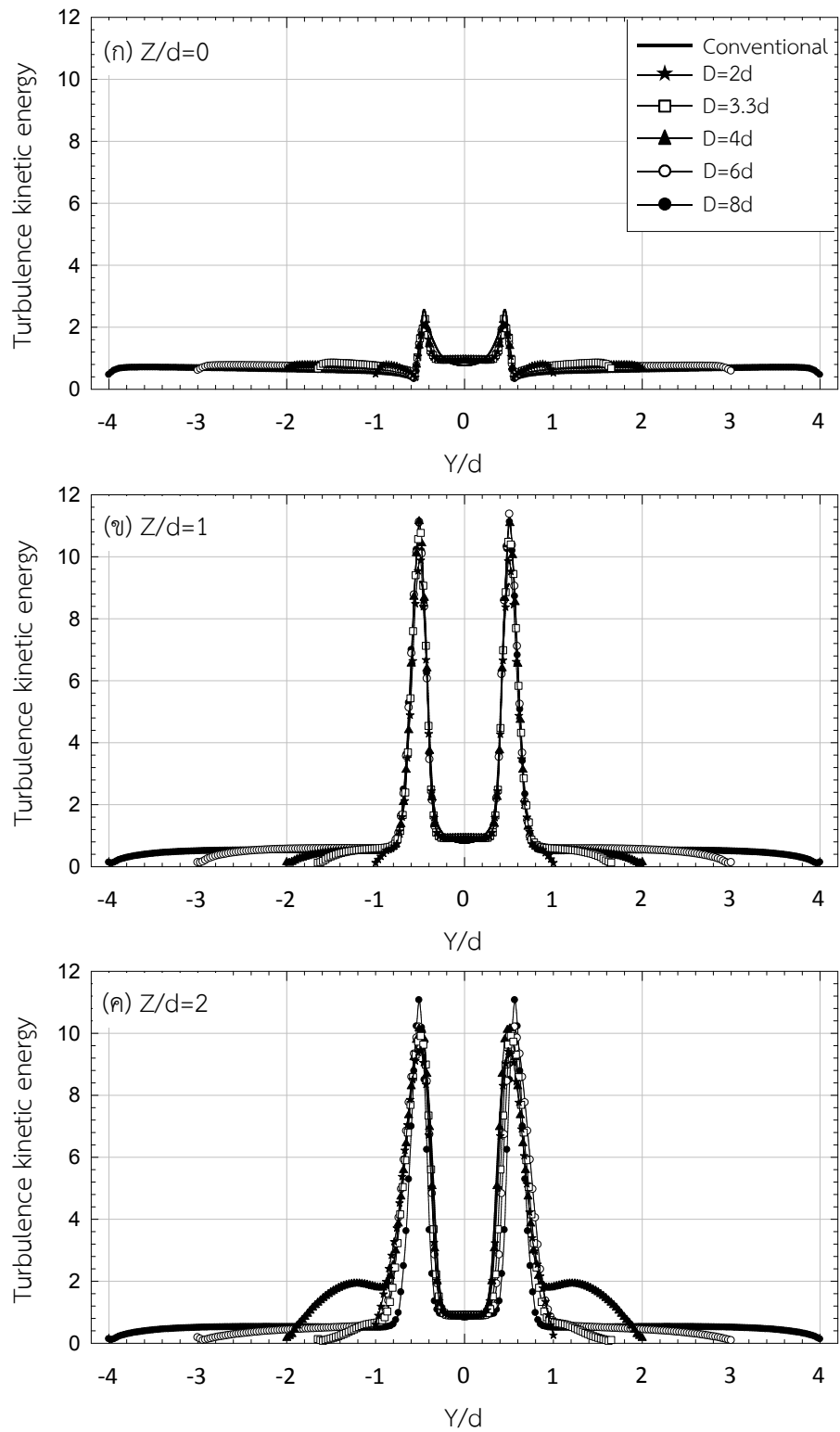
รูปที่ 57 แสดงแนวเส้นที่ตัดผ่านหน้าตัดเจ็ทสำหรับการกระจายความเร็ว และการกระจายพลังงานความปั่นป่วน

รูปที่ 58 แสดงการกระจายความเร็วภายในหน้าตัดเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) โดยภาพรวมพบว่า ลักษณะการกระจายความเร็วของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อ ที่ตำแหน่ง $Z/d=0, 1$ และ 2 (รูปที่ 58(ก), 58(ข) และ 58(ค)) มีความเร็วสูงสุดตรงบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แล้วค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ท (ในช่วง $-0.5 \leq Y/d \leq 0.5$) และมีการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทสูงสุดที่ตำแหน่ง $Z/d=0$ แล้วลดลงตามความยาวปลอกท่อ (L)

รูปที่ 59 แสดงการกระจายพลังงานความปั่นป่วนภายในหน้าตัดเจ็ท ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ (ความยาวปลอกท่อ $L=2d$) โดยภาพรวมพบว่า ลักษณะการกระจายพลังงานความปั่นป่วนของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อที่ตำแหน่ง $Z/d=0, 1$ และ 2 (รูปที่ 59(ก), 59(ข) และ 59(ค)) การกระจายพลังงานความปั่นป่วนต่ำสุดที่ตำแหน่ง $Z/d=0$ ค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความยาวปลอกท่อ (L) และการกระจายพลังงานความปั่นป่วนต่ำสุดบริเวณจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีของเจ็ท ซึ่งสังเกตเห็นได้ชัดเจนบริเวณในช่วง $-1 \leq Y/d \leq 1$ และยังพบว่า ที่ตำแหน่ง $Z/d=2$ เจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อ ในกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ (รูปที่ 59(ค)) ให้ค่าพลังงานความปั่นป่วนสูงที่สุด (บริเวณ $1 \leq Y/d \leq 2$ (สมมาตร)) เมื่อเทียบกับเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองข้างต้น



รูปที่ 58 แสดงการกระจายความเร็วที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท
(เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



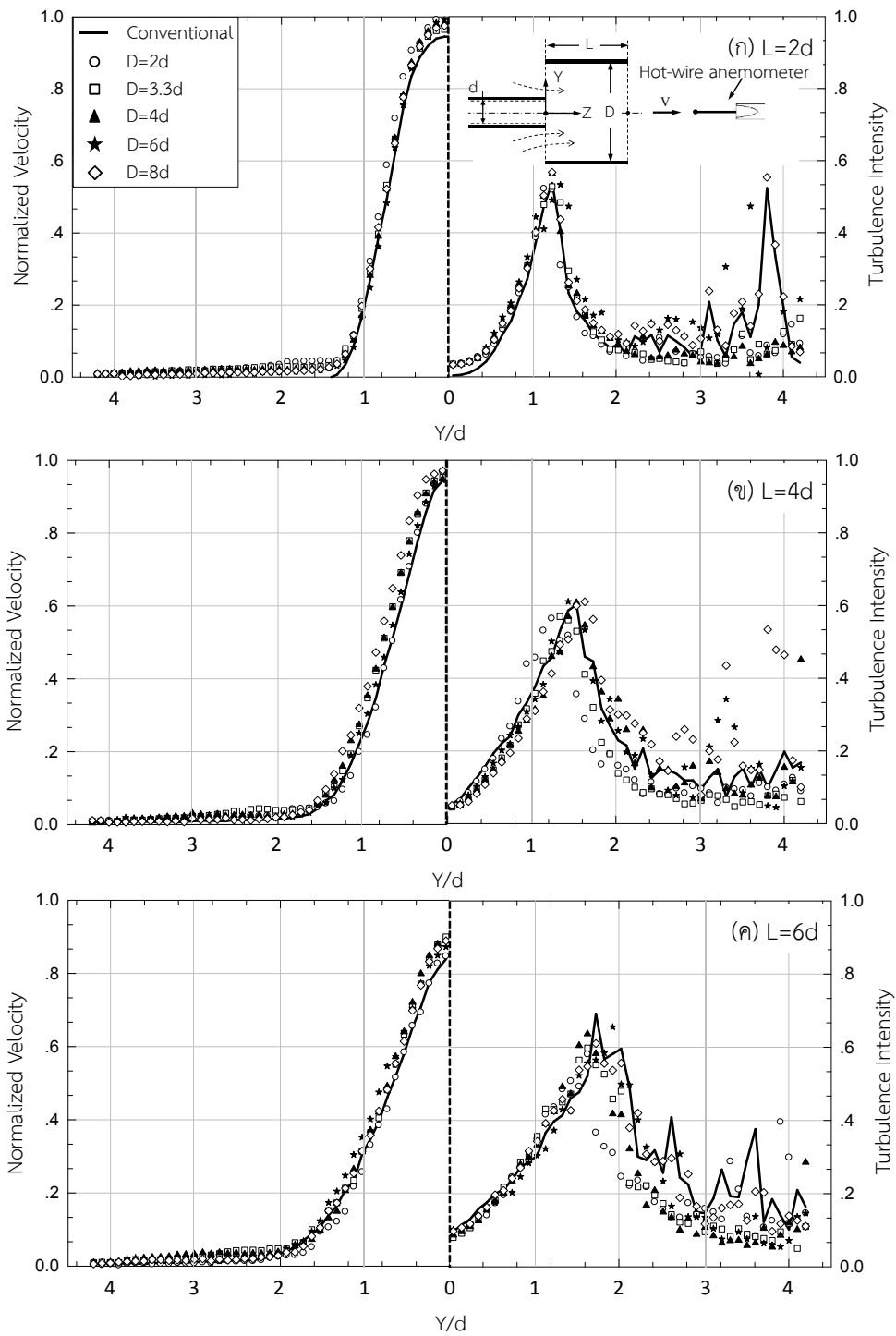
รูปที่ 59 แสดงการกระจายพลังงานความปั่นป่วนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

5.2.6 ลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน

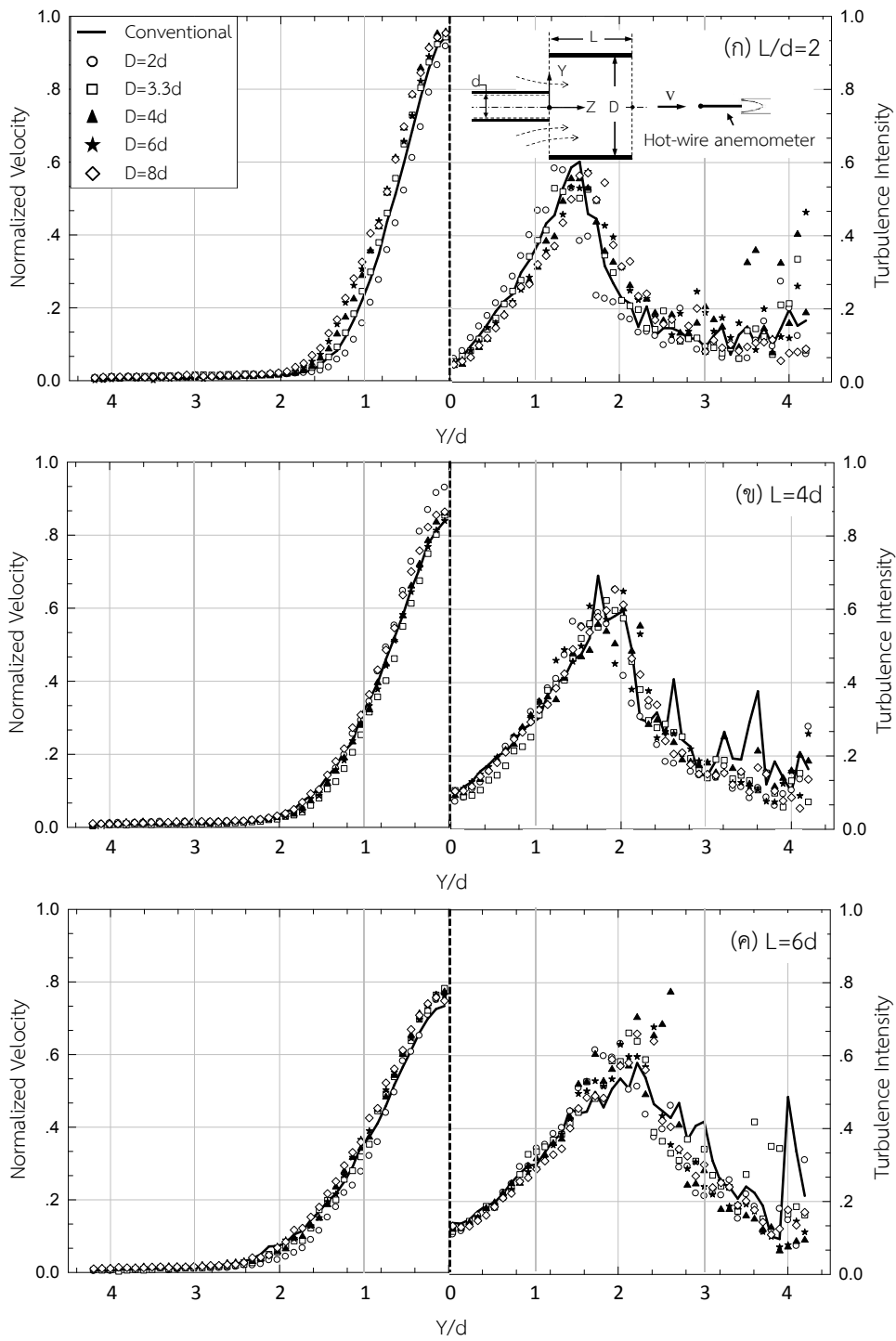
รูปที่ 60 และ 61 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Y ที่ตำแหน่ง $Z/d=0$ จากผลการศึกษาโดยภาพรวมพบว่า กรณีของเจ็ทแบบท่อติดปลอก ลักษณะการกระจายความเร็วตรงจุดศูนย์กลางของลำเจ็ท (ตำแหน่ง $Z/d=0$) มีค่าความเร็วสูงสุด แล้วค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมี ซึ่งสูงกว่ากรณีเจ็ทจากท่อปกติ ในขณะที่การกระจายความปั่นป่วนบริเวณจุดศูนย์กลางของลำเจ็ทมีค่าต่ำที่สุด และจะเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมี โดยเฉพาะบริเวณรอบข้างของลำเจ็ทมีค่าความปั่นป่วนสูงที่สุดในช่วงบริเวณ $1 \leq Y/d \leq 2$ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวลำเจ็ทเกิดการเหนี่ยวนำอากาศจากด้านหลังเข้ามาผสมกับอากาศที่อยู่ภายในปลอกท่อเพิ่มมากขึ้น ทำให้การกระจายความปั่นป่วนสูงขึ้นตาม และยังพบว่า การกระจายความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นในช่วงบริเวณ $3 \leq Y/d \leq 4$ ซึ่งเป็นบริเวณของชั้นเฉือน (Shear layer) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วทำให้มีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น

รูปที่ 60 แสดงลักษณะการกระจายความเร็ว และความปั่นป่วนตามแนวแกน Y ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S/d=0$ ($H=2d$) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d, 4d, 6d$ และ $8d$ ตามลำดับ พบว่า ลักษณะการกระจายความเร็ว และความปั่นป่วนสูงกว่าเจ็ทจากท่อปกติ ตรงบริเวณจุดศูนย์กลางเจ็ท แล้วลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ท ซึ่งที่ความยาวปลอกท่อ (L) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการกระจายความเร็วลดลง (บริเวณช่วง $1 \leq Y/d \leq 2$) และให้ค่าการกระจายความปั่นป่วนเพิ่มสูงขึ้น (บริเวณช่วง $1 \leq Y/d \leq 4$)

รูปที่ 61 แสดงลักษณะการกระจายความเร็ว และความปั่นป่วนตามแนวแกน Y ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกปลอกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S/d=2$ ($H=4d$) พบว่า ที่เงื่อนไขความยาวปลอกท่อ $L=2d$ (รูปที่ 61(ก)) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=3.3d, 4d, 6d$ และ $8d$ ตามลำดับ ลักษณะการกระจายความเร็ว และความปั่นป่วนสูงกว่าเจ็ทจากท่อปกติ ตรงบริเวณจุดศูนย์กลางเจ็ท และลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ท ในขณะที่ความยาวปลอกท่อ (L) เพิ่มขึ้น (รูปที่ 61(ข) และ 61(ค)) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d, 6d$ และ $8d$ ตามลำดับ ลักษณะการกระจายความเร็ว และความปั่นป่วนสูงกว่าเจ็ทจากท่อปกติ ตรงบริเวณจุดศูนย์กลางเจ็ท แล้วลดลงตามแนวรัศมีของเจ็ท และยังพบว่า ที่ความยาวปลอกท่อ (L) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าการกระจายความปั่นป่วนเพิ่มสูงขึ้น



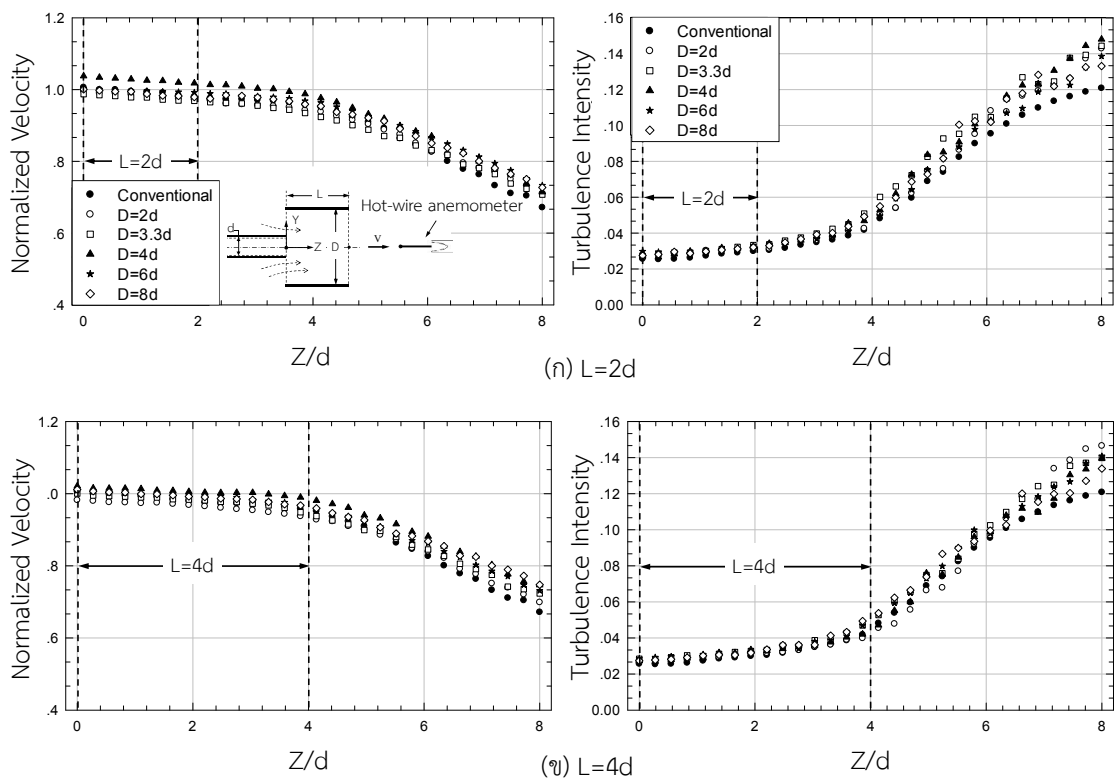
รูปที่ 60 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Y ที่ปากทางออก
 ปอดท่อตำแหน่ง $S/d=0$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



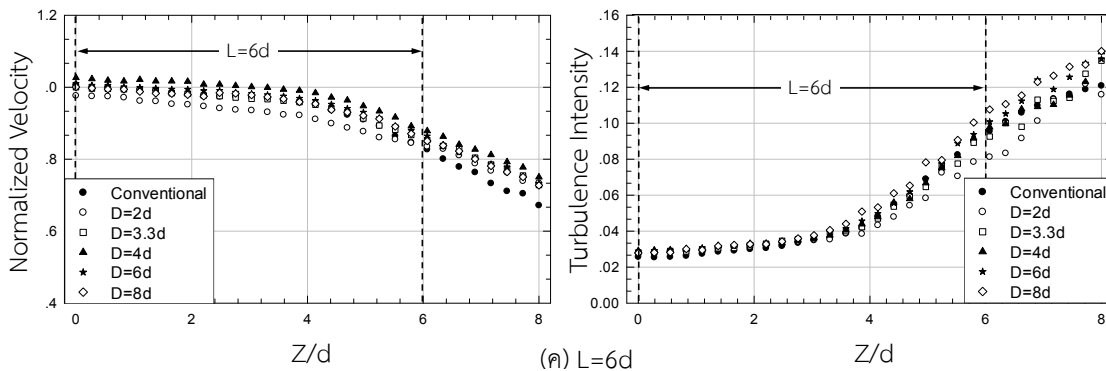
รูปที่ 61 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Y ที่ปากทางออก
 ปลอกท่อตำแหน่ง $S/d=2$ (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)

รูปที่ 62 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Z กรณีความยาวปลอกท่อ $L=2d$, $4d$ และ $6d$ ดังแสดงในรูปที่ 62(ก), 62(ข) และ 62(ค) ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท (Z/d) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความเร็วของเจ็ทลดลงอย่างต่อเนื่อง และความปั่นป่วนของเจ็ทจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท (Z/d) เมื่อความยาวปลอกท่อ (L) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความเร็วของเจ็ทในแนวแกนลดลง และความปั่นป่วนของเจ็ทเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งเห็นได้ชัดเจนบริเวณในช่วง $0 \leq Z/d \leq 6$

โดยภาพรวมลักษณะการกระจายความเร็วบนแกน Z กรณีเจ็ทจากท่อที่ติดตั้งปลอกท่อ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ มีค่าสูงกว่ากรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติทุกๆ กรณี และลักษณะการกระจายความปั่นป่วนตามแนวแกน Z กรณีเจ็ทจากท่อที่ติดตั้งปลอกท่อ มีค่าใกล้เคียงกับเจ็ทจากท่อปกติทุกๆ เงื่อนไขที่ความยาวปลอกท่อ (L) เห็นได้ชัดเจนบริเวณในช่วง $0 \leq Z/d \leq 4$ แต่เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ท (Z/d) เพิ่มขึ้น ในช่วง $4 \leq Z/d \leq 8$ พบว่าลักษณะการกระจายความปั่นป่วนบนแกน Z กรณีเจ็ทจากท่อที่ติดตั้งปลอกท่อสูงกว่าเจ็ทจากท่อปกติไม่มากนัก



รูปที่ 62 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Z (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$)



รูปที่ 62 แสดงลักษณะการกระจายความเร็วและความปั่นป่วนตามแนวแกน Z (เจ็ทอากาศ, $Re=20,000$) (ต่อ)

5.2.7 สมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนสำหรับเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อ

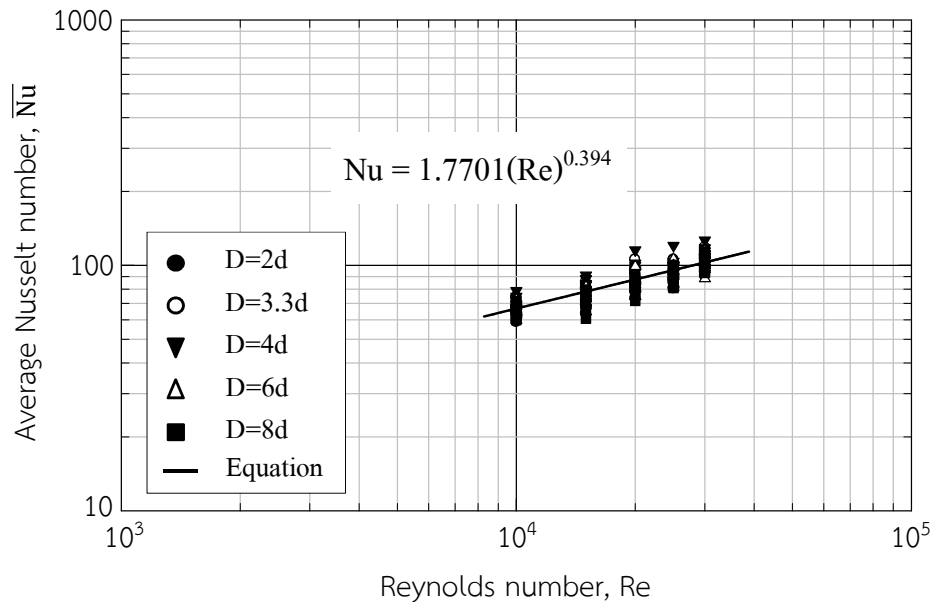
รูปที่ 63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (\overline{Nu}) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) สำหรับการไหลในช่วง $10,000 \leq Re \leq 30,000$ ซึ่งได้จากการทดลองแล้วพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าว เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\overline{Nu} = 1.7701(Re)^{0.3940} \quad (28)$$

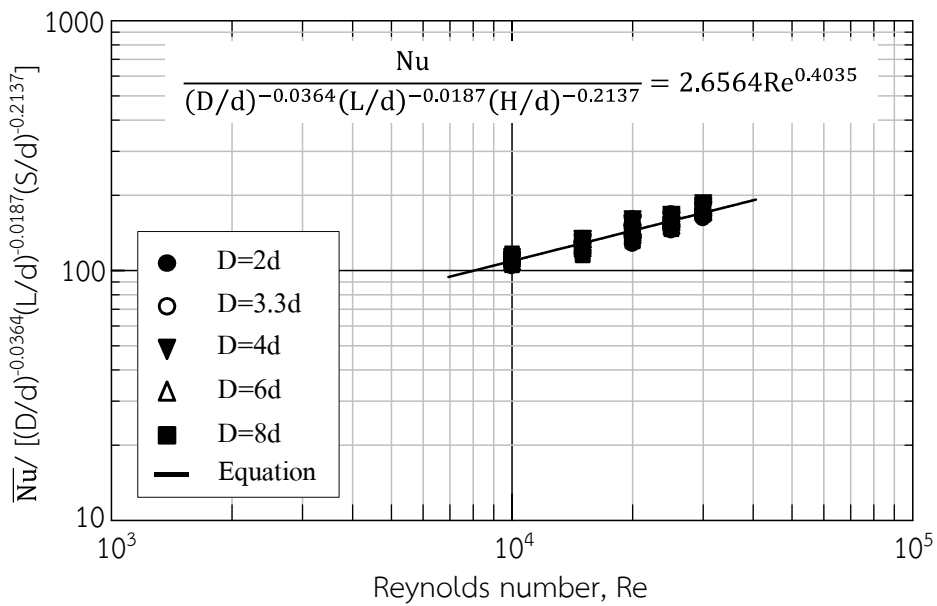
ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (28) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 63 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับผลการทดลองค่อนข้างดี อย่างไรก็ตาม หากคำนึงถึงอิทธิพลของความยาวปลอกท่อ (L) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ (D) และระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) ที่มีผลต่อค่าตัวเลขถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (\overline{Nu}) ดังแสดงในรูปที่ 64 แล้ว จะได้ความสัมพันธ์ของสมการ ดังต่อไปนี้

$$\overline{Nu} = 2.6564(Re)^{0.4035} (D/d)^{-0.0364} (L/d)^{-0.0187} (H/d)^{-0.2137} \quad (29)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ดังสมการที่ (29) นี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 64 โดยภาพรวมแล้วพบว่า ความสัมพันธ์นี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าความสัมพันธ์ ตามสมการที่ (28)



รูปที่ 63 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและสมการทำนาย คำนวณสเกลต์นัมเบอร์เฉลี่ย (เจ็ทอากาศ, $10,000 \leq Re \leq 30,000$)



รูปที่ 64 แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งความสัมพันธ์ของค่านัสเชิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (เจ็ทอากาศ, $10,000 \leq Re \leq 30,000$)

6. สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการไหล และการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทไหลพุ่งชน เมื่อใช้หัวฉีดแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนำอากาศ (Expansion pipe) และหัวฉีดแบบติดตั้งปลอกท่อเหนือวนำอากาศ (Sleeve pipe) เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีของหัวฉีดแบบท่อปกติ (Conventional pipe)

สำหรับการศึกษาลักษณะการไหลได้วัดการกระจายความเร็ว ความปั่นป่วน เพื่อดูลักษณะการไหลของเจ็ทอิสระ และศึกษาการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวด้วยวิธีการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อนำผลการศึกษามาใช้ในการอธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว สำหรับการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared camera) เพื่อถ่ายภาพการกระจายของอุณหภูมิ และวิเคราะห์การกระจายของนั้สเซลต์นัมเบอร์บนพื้นผิว จากผลการศึกษารูปได้ดังนี้

6.1.1 กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนำอากาศ

(1) การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนำอากาศแบบ 4 รู และแบบไม่มีรูเหนือวนำอากาศไม่แตกต่างจากกรณีท่อปกติมากนัก ซึ่งการเพิ่มจำนวนรูเจาะเหนือวนำอากาศเป็น 6 และ 8 รู ไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น

(2) ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนำอากาศ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) ต่ำๆ มีการดึงอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทภายในท่อขยายมากขึ้น แต่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น จะมีอากาศบางส่วนไหลย้อนกลับเข้ามาผสมภายในท่อขยายหน้าตัด

6.1.2 กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนือวนำอากาศ

(1) การถ่ายเทความร้อนกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนือวนำอากาศ ที่เส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=4d$ ความยาวปลอกท่อ $L=2d$ ที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $H=4d$ มีผลทำให้นั้สเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 25.42% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อปกติ

(2) ลักษณะการไหลของเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนือวนำอากาศ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลอกท่อ $D=2d, 3.3d$ และ $4d$ ตามลำดับ และระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) ต่ำๆ มีการดึงอากาศเข้ามาผสมกับลำเจ็ทภายในปลอกท่อมากขึ้น ทำให้มีความเร็วเจ็ทเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น แต่เมื่อระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน (H) เพิ่มขึ้น จะมีอากาศบางส่วนไหลย้อนกลับเข้ามาผสมภายในปลอกท่อ ทำให้มีความเร็วลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนน้อยลงด้วย

การศึกษาทั้งสองกรณีข้างต้นโดยภาพรวมพบว่า กรณีเจ็ทพุ่งชนแบบติดตั้งปลอกท่อเหนือวนำอากาศ สามารถให้ค่าการกระจายนั้สเซลต์นัมเบอร์เฉลี่ยสูงกว่ากรณีเจ็ทพุ่งชนแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนำอากาศ เนื่องจากสามารถดึงอากาศเข้ามาผสมภายในปลอกท่อมากกว่า และยังช่วยเพิ่มความเร็วของลำเจ็ทที่สูง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีกว่าแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนำอากาศ

6.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทอากาศพุ่งชนพื้นผิวโดยวิธีเชิงทัศน (Laser induced fluorescence) เพื่อนำผลลักษณะการไหลของเจ็ทที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวพุ่งชน ไปอธิบายผลของการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้ให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

(2) หัวฉีดแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ อาจใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มการผสมของเจ็ท

(3) หัวฉีดแบบติดตั้งปลอกท่อเหนี่ยวนำอากาศ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากง่ายต่อการสร้างหรือติดตั้ง อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีการกระตุ้นจากแหล่งพลังงานภายนอก ทำให้สามารถประหยัดพลังงาน ประหยัดค่าใช้จ่าย และได้ลดต้นทุนพลังงาน

บรรณานุกรม

- [1] “Hyper TX3 - Cooler Master”, Online, Available: http://www.coolermaster-usa.com/product.php?product_id=2922., Accessed: July 08, 2014.
- [2] Murata, A. and Mochizuki, S., “Effective cooling of gas turbine elements: CO₂ reduction, complicated turbulent heat transfer”, Thermal Fluids Engineering Lab, Online, Available: <http://www.mmlab.mech.tuat.ac.jp/mmlab/research-gt-e.shtml>, Accessed May 29, 2014.
- [3] Trávníček, Z. and Tesar, V., **(2004)**, “Annular impinging jet with recirculation zone expanded by acoustic excitation”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No. 10-11, pp. 2329-2341.
- [4] Nuntadusit, C., Wae-hayee, M., Bunyajitradulya, A., and Eiamsa-ard, S., **(2012)**, “Visualization of flow and heat transfer characteristics for swirling impinging jet”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 39, No. 5, pp. 640-648.
- [5] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K. and Whitney, C.F., **(1997)**, “Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 14, No. 1, pp. 60-67.
- [6] Gao, N., Sun, H. and Ewing, D., **(2003)**, “Heat transfer to impinging round jets with triangular tabs”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, No. 14, pp. 2557-2569.
- [7] Colucci, D.W. and Viskanta, R., **(1996)**, “Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 13, No. 1, pp. 71-80.
- [8] Ashforth-Frost, S. and Jambunathan, K., **(1996)**, “Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 23, No. 2, pp. 155-162.
- [9] Göppert, S., Gürtler, T., Mocikat, H. and Herwig, H., **(2004)**, “Heat transfer under a precessing jet: effects of unsteady jet impingement”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No. 12-13, pp. 2795-2806.

- [10] Zhou, J.W. and Herwig, H., **(2007)**, “Heat transfer characteristics of precessing jets impinging on a flat plate: Further investigations”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 21-22, pp. 4488-4492.
- [11] Limaye, M.D., Gulati, P., Vedula, R.P. and Prabhu, S.V., **(2013)**, “Effect of the profile of a convergent nozzle on heat transfer distribution of a flat plate impinged by an under-expanded jet”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 45, pp. 75-91.
- [12] Herrero Martin, R. and Buchlin, J.M., **(2011)**, “Jet impingement heat transfer from lobed nozzles”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 7, pp. 1199-1206.
- [13] Menter, F.R., **(1994)**, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 32, No.8, pp.269-289.
- [14] Menter, F.R., Carregal Ferreira, J., Esch, T.M. and Konno, B., **(2003)**, “The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines”, *International Gas Turbine Congress*, November 2-7, Tokyo
- [15] Salim, M. and Cheah, S.C., **(2009)**, “Wall y^+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows,” *International MultiConference of Engineering and Computer Scientists*, vol. 2, March 18-20, Hong Kong.
- [16] Heo, M.W., Lee, K.D. and Kim, K.Y., **(2011)**, “Optimization of an inclined elliptic impinging jet with cross flow for enhancing heat transfer”, *Heat Mass Transfer*, Vol. 47, No. 6, pp. 731-742.
- [17] ANSYS, Inc., **(2009)**, “ANSYS fluent 12.0 theory guide”, Vol. 12, Canonsburg, Pennsylvania, United States.
- [18] Lytle, D. and Webb, B.W., **(1994)**, “Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, pp. 1687-1697.
- [19] Gulati, P., Katti, V. and Prabhu, S.V., **(2009)**, “Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet”, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 3, pp. 602-617.
- [20] Lee, D.H., Song, J. and Myeong, C.J., **(2004)**, “The effect of nozzle diameter on impinging jet heat transfer fluids flow”, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 126, pp. 554-557.

- [21] Baughn, J.W. and Shimizu, S., **(1989)**, “Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet”, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1096-1098.
- [22] Viskanta, R., **(1993)**, “Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 6, pp.111-134.
- [23] Geers, L.F.G., **(2003)**, “Multiple impinging jet arrays: an experimental study on flow and heat transfer”, Technische Universiteit Delft, Netherlands.

ภาคผนวก ก.

บทความสำหรับเผยแพร่ 1

“ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัด
ที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ”

การประชุมวิชาการการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10



ลักษณะการไหลและถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัด
ที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ

**Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Expansion Pipe Nozzle
with Air Entrainment Holes**

ณัฐพร แก้วชูทอง, มัถดาร์ แวหะยี, ภาสกร เวสสะโกศล และ ชยุต นันทคุสิต*

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

*ติดต่อ: E-mail: chayut@me.psu.ac.th โทรศัพท์: 074 287 036, โทรสาร: 074 558 830

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ ในการทดลองกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขยายหน้าตัดกำหนดที่ $D=4d$ ระยะระหว่างปากทางออกท่อเล็กถึงท่อขยายหน้าตัด $L=2d$ (d คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเจ็ท) จำนวนรูเจาะเหนี่ยวนำอากาศ $N=4, 6$ และ 8 รู และระยะระหว่างปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวพุ่งชน $H=2d, 4d$ และ $6d$ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ทท่อเปล่ากำหนดให้คงที่ $Re=20,000$ สำหรับเจ็ทท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศกำหนดให้อัตราการไหลอากาศจากท่อเจ็ทเท่ากันทุกเงื่อนไข โดยเทียบกับอัตราการไหลของเจ็ทท่อเปล่า ในการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรดทำการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ในการหาค่านัสเซิลด์นัมเบอร์ที่กระจายบนพื้นผิว นอกจากนี้ได้ศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการไหล (CFD) จากการศึกษาพบว่าเจ็ทท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศสามารถดึงอากาศรอบๆ เข้ามาผสมกับเจ็ทได้มากกว่าเจ็ทท่อเปล่า มีผลทำให้บริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

คำหลัก: เจ็ทพุ่งชน, ท่อขยายหน้าตัด, การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน, คุณสมบัติการไหล, รูเหนี่ยวนำอากาศ

Abstract

The aim of this research is to study the flow and heat transfer characteristics on jet impinging wall from expansion pipe nozzle. The experimental parameters were given the inner diameter of expansion pipe in ranging of $D=4d$, the distance from jet outlet to expansion pipe outlet $L=2d$ (d is inner diameter of pipe nozzle), number of air entrainment holes $N=4, 6$ and 8 , and the jet-to-plate distance $H=2d, 4d$ and $6d$. The Reynolds number of conventional jet was fixed at $Re=20,000$. The mass flow rate of jet from expansion pipe nozzle with air entrainment holes was fixed for all conditions, and it was equaled to the mass flow rate of conventional jet. The heat transfer characteristic was studied by using infrared camera. The flow characteristic of jet was studied by using commercial program CFD.

The results show that the jet from expansion pipe nozzle with air entrainment holes can entrain the environmental air to the jet higher than the conventional jet. This affects the increasing of heat transfer rate in impinging region.

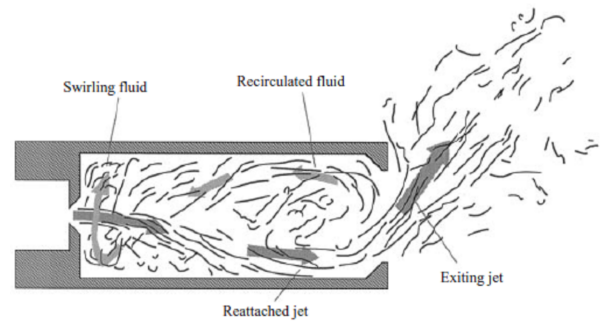
Keywords: *Impinging jet, Expansion pipe nozzle, Heat transfer enhancement, Flow characteristic, Air entrainment holes*

1. บทนำ

เจ็ทเป็นปรากฏการณ์การไหลที่มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เป็นลักษณะการไหลที่สำคัญในทางกลศาสตร์ของไหล มีโครงสร้างการไหลที่ซับซ้อน มีการไหลแบบชั้นการไหลเฉือน (Shear layer) และมีรูปแบบการไหลที่หลากหลาย เช่น การไหลของเจ็ทแบบอิสระ การไหลของเจ็ทที่ปะทะพื้นผิว การไหลของเจ็ทที่จำกัดบริเวณโดยผนัง ซึ่งส่วนใหญ่พบได้ทั่วไปในทางวิศวกรรม เช่น หัวฉีดเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ หัวฉีดสารเคมีในถังผสม หัวจ่ายลมในระบบปรับอากาศ หัวเผาให้ความร้อนเพื่อให้ความร้อนพื้นผิว หรือหัวฉีดระบบระบายความร้อนพื้นผิว เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการพยายามที่จะใช้วิธีการควบคุมการไหลของเจ็ทเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ท [1, 2] ซึ่งโดยทั่วไปการควบคุมการไหลแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การควบคุมการไหลแบบกระตุ้นจากภายนอก (Active Control) เป็นการควบคุมการไหลโดยอาศัยพลังงานจากภายนอกในการควบคุมการไหลของเจ็ท และการควบคุมการไหลแบบไม่มีการกระตุ้นจากภายนอก (Passive Control) เป็นการควบคุมการไหลแบบไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว ซึ่งจะมีข้อดีกว่าแบบแรกคือไม่มีอุปกรณ์ควบคุมที่ซับซ้อน ราคาถูก สามารถใช้งานได้ง่ายในอุตสาหกรรม

การออกแบบให้ปากทางออกเจ็ทขยายหน้าตัด เป็นการควบคุมการไหลของเจ็ทรูปแบบหนึ่งที่ไม่มีการกระตุ้นจากภายนอก ซึ่งจะส่งผลทำให้การไหลของเจ็ทเกิดความปั่นป่วนมากกว่าเจ็ทที่ไหลออกจากปากทางออกเจ็ทแบบธรรมดา (แบบไม่ขยายหน้าตัด) รูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะโครงสร้างการไหลของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัด [3]

เจ็ทหลังจากที่ไหลออกจากปากทางออกภายใน จะเกิดการไหลแบบตกกระทบ (Reattachment flow) บนพื้นผิวภายในท่อขยายหน้าตัด และไหลออกที่ปากทางออกท่อขยายหน้าตัดในลักษณะที่เป็นมุมกับแนวแกน นอกจากนี้เจ็ทบางส่วนไหลหมุนย้อนกลับ (Recirculation flow) ผสมกับเจ็ทที่กำลังพุ่งออกจากปากทางออกรูเล็ก ทำให้สามารถดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับเจ็ทภายในห้องที่ทำการขยายหน้าตัด ทำให้ความปั่นป่วนในการไหลของเจ็ทสูงกว่าเมื่อเทียบกับเจ็ทธรรมดา [3]

การใช้หลักการควบคุมการไหลของเจ็ทแบบท่อขยายหน้าตัดส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในกรณีการเพิ่มอัตราการผสมระหว่างของไหลสองชนิดด้วยเจ็ทผสม (Jet mixing) หรือใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของหัวเผา อย่างไรก็ตามยังไม่มียานวิจัยที่จะนำหลักการดังกล่าวนี้ใช้ในกรณีการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน เนื่องจากตัวแปรสำคัญที่สามารถช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิวคือ การเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของเจ็ทก่อนพุ่งชนพื้นผิว [4, 5]

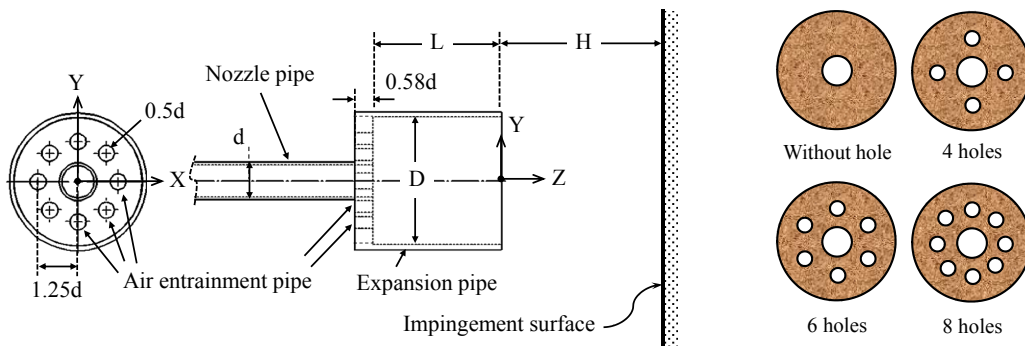
ในงานวิจัยนี้จะศึกษากรณีเจ็ทที่ไหลออกจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกเข้ามาผสม เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว ในงานวิจัยได้พิจารณาผลของจำนวนรูเจาะ และระยะระหว่างปากทางออกท่อถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

2. ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

2.1 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 2 แสดงโมเดลของเจ็ทแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในการทดลองกำหนดให้พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมี ฟลักซ์ความร้อนคงที่ และใช้เจ็ทที่อุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวเพื่อระบายความร้อน ในการทดลองกำหนดให้เจ็ทจากท่อเปล่ามีค่าเรย์โนลด์สของเจ็ทที่ $Re=20,000$ (ใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ทและความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ทในการคำนวณ) ในกรณีของเจ็ท

แบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศ ได้กำหนดให้อัตราการไหลของเจ็ทที่ตลอดการทดลอง โดยเทียบกับอัตราการไหลของเจ็ทจากท่อเปล่า $H=2d$, $H=4d$ และ $6d$ โดยที่ d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท ในการศึกษาขนาดท่อขยาย (ท่อใหญ่) กำหนดที่เส้นผ่านศูนย์กลาง $D=4d$ สำหรับระยะระหว่างปากทางออกท่อเจ็ท และท่อขยายกำหนดที่ $L=2d$ จำนวนรูเจาะบริเวณด้านหลัง (ท่อขยาย) กำหนดที่เงื่อนไข 0, 4, 6 และ 8 รูเจาะ ตามลำดับโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู $0.5d$ และตำแหน่งของรูเจาะที่รัศมี $r=1.25d$ นอกจากนี้ได้ทำการทดลองกรณีเจ็ทจากท่อเปล่าเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัด สำหรับจุดกำเนิดของพิกัดฉากเริ่มต้นที่ศูนย์กลางของปลายท่อเจ็ท แกน Z อยู่ในแนวเดียวกับการไหลเจ็ท แกน X และ Y ตั้งฉากกับแกน Z ในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ



a) แสดงโมเดลของท่อขยายหน้าตัด

b) แสดงรูปแบบรูเจาะเหนี่ยวนำอากาศที่ศึกษา

รูปที่ 2 แสดงโมเดลของเจ็ทแบบท่อขยายหน้าตัดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศ

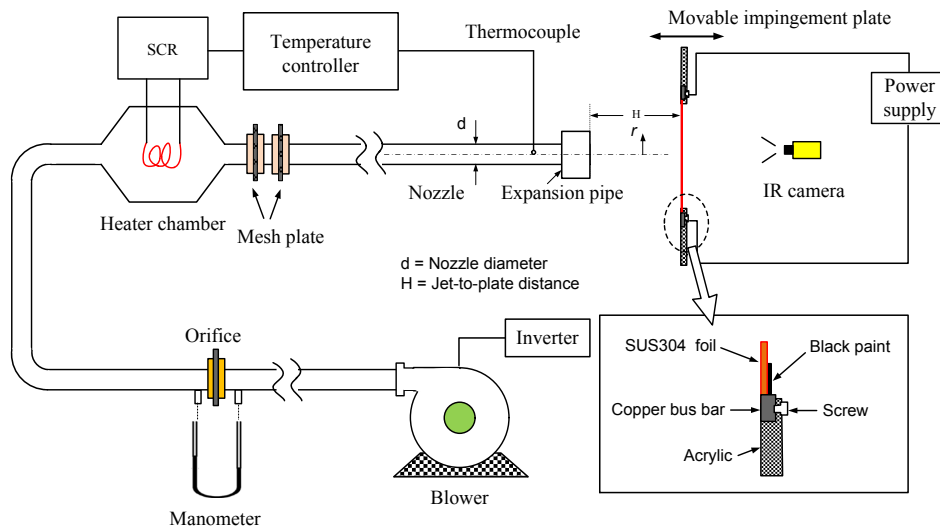
2.2 ชุดทดลอง

ชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยโบลเวอร์ใช้สำหรับดูดอากาศแล้วส่งผ่านไปยังออร์ฟิตเพื่อวัดอัตราการไหล จากนั้นอากาศจะผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศ

โดยคอนโทรลเลอร์และไหลออกจากท่อ ในการทดลองอัตราการไหลของอากาศควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ที่ต่อกับโบลเวอร์ สำหรับอุณหภูมิเจ็ทได้กำหนดให้คงที่อยู่ในช่วง $27^{\circ}\text{C}\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ และควบคุมให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง (แตกต่างกันไม่เกิน 0.5°C)

สำหรับท่อเจ็ททำจากเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $d=17.2$ mm และมีความยาว 83d ในการทดลองได้ใช้แผ่นสแตนเลสแบบบาง (Stainless foil) ที่มีความหนา 0.03 mm เป็นผนังที่เจ็ทพุ่งชน แผ่นสแตนเลสนี้จะถูกขึงให้เรียบตึงกับแผ่นพลาสติกหนา 15 mm ที่เจาะหน้าต่างขนาด 240 mm x 240 mm ไว้กึ่งกลางแผ่น โดยใช้แท่งทองแดงยึดแผ่นสแตนเลสแบบบาง (Stainless foil)

ไว้ทั้งสองข้าง แท่งทองแดงทั้งสองนี้จะต่อเข้ากับขั้วของตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) และแผ่นสแตนเลสแบบบาง ถูกพ่นด้วยสีดำด้านสำหรับทำการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรดซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2\%$ และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อน (Emissivity) ในการวัดค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนเท่ากับ 0.95



รูปที่ 3 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา

2.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านแท่งทองแดงไปยังแผ่นสแตนเลสแบบบาง (Stainless foil) จะเกิดความร้อนขึ้นทั่วทั้งบริเวณแผ่นสแตนเลสแบบบาง ซึ่งอัตราการเกิดความร้อนนี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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

- เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่าย, A
 V คือ แรงดันไฟฟ้า, Volt
 A คือ พื้นที่ของพื้นผิวพุ่งชน, m^2

สำหรับการทดลองนี้จะใช้เจ็ทอากาศที่ประมาณอุณหภูมิห้องพุ่งชนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ เพื่อระบายความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{lost}}{T_{wh} - T_{wnh}} \quad (2)$$

- เมื่อ \dot{q}_{lost} คือ การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสี, W/m^2
 T_{wh} คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อน, $^{\circ}C$
 T_{wnh} คือ อุณหภูมิบนพื้นผิวที่ไม่มีฟลักซ์ความร้อน, $^{\circ}C$

จากสมการ (2) สามารถคำนวณหาค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ได้จากสมการ

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

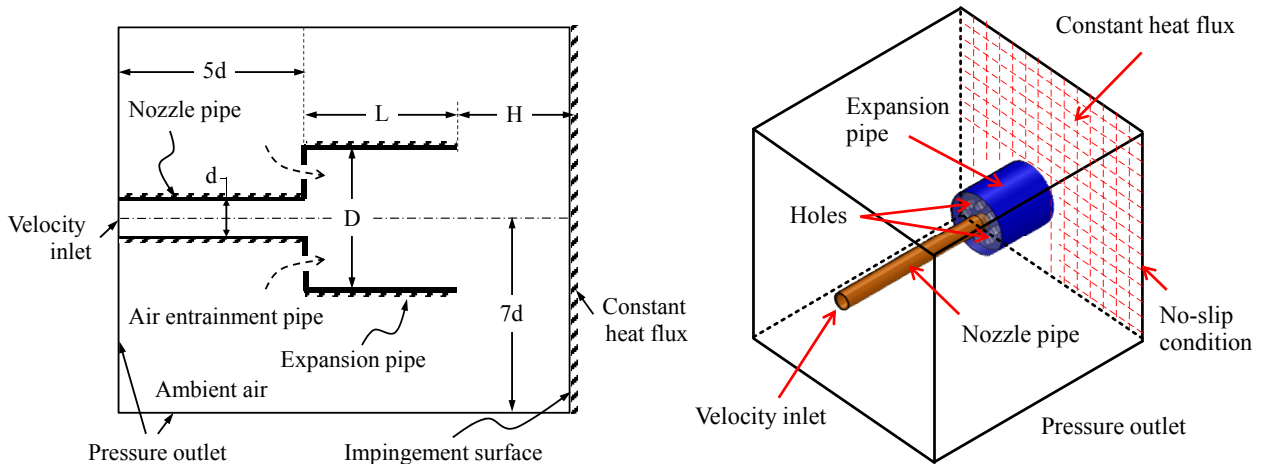
เมื่อ d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อเจ็ท, mm

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ของอากาศ, W/m²·K

3. การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข

ในการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการไหล (ANSYS Ver.13, Fluent) รูปที่ 4 แสดงโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหลที่



a) แสดงภาพตัดขวางแบบ 2 มิติ

b) แสดงโมเดลการจำลอง 3 มิติ

รูปที่ 4 แสดงโมเดลที่ใช้ในการจำลองการไหล

4. ผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติการไหล

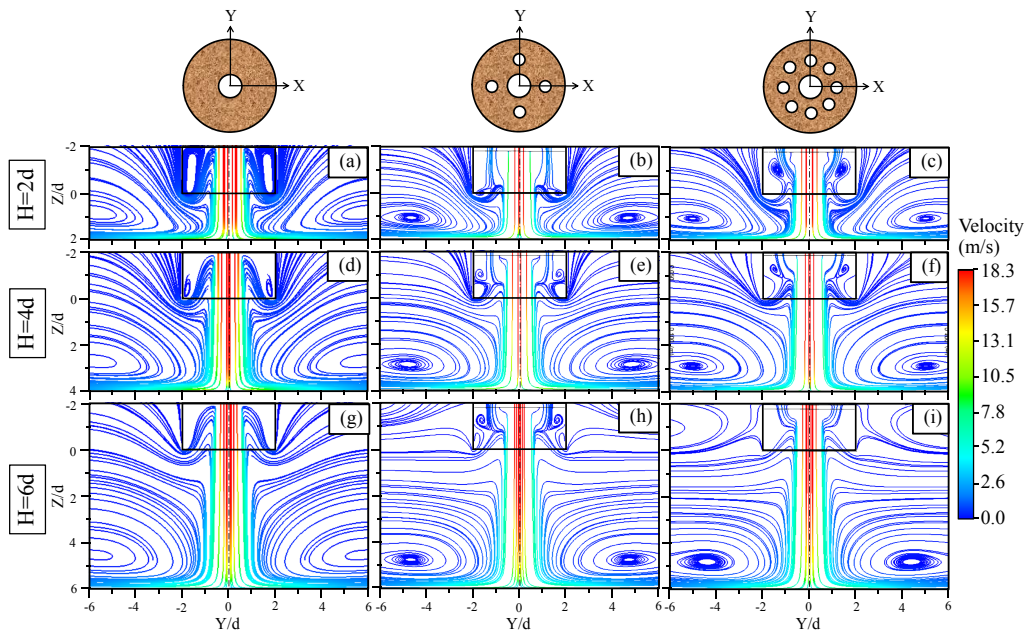
รูปที่ 5 แสดงเส้นทางการไหล (Streamlines) ของเจ็ทอากาศบนแกน Y-Z ตรงกลางเจ็ทจากผลการจำลองทางพลศาสตร์ของไหล ท่อขยายหน้าตัดที่เงื่อนไข $L=2d$ และ $D=4d$ สำหรับทุกกรณี ท่อขยายหน้าตัดที่ไม่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศที่เงื่อนไข $H=2d$, $H=4d$ และ

เป็นแบบ 3 มิติ โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ททงที่เท่ากับที่ใช้ในการทดลอง สำหรับระยะจากปากทางออกเจ็ท (ท่อขยาย) ถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน H ระยะปากทางออกระหว่างท่อเจ็ทและปากท่อขยาย L และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขยาย D สามารถปรับขนาดได้ตามตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง โมเดลของการไหลแบบปั่นป่วนได้ใช้แบบ SST $k-\omega$ (Shear Stress Transport $k-\omega$) และใช้วิธีการคำนวณแบบ SIMPLE สำหรับค่าความผิดพลาดของการคำนวณครั้งสุดท้ายได้กำหนดให้มีค่าต่ำกว่า 1×10^{-4} [6]

$H=6d$ (รูปที่ 5(a), 5(d) และ 5(g)) ในกรณีของท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศแบบ 4 รู ที่เงื่อนไข $H=2d$, $H=4d$ และ $H=6d$ (รูปที่ 5(b), 5(e) และ 5(h)) กรณีท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศแบบ 8 รู ที่เงื่อนไข $H=2d$, $H=4d$ และ $H=6d$ (รูปที่ 5(c), 5(f) และ 5(i)) เจ็ทที่ไหลออกจากท่อขยายหน้าตัดที่ไม่มีการเจาะรูเหนือยวนำอากาศจะมีอากาศรอบๆ เจ็ทเข้ามาผสม

ภายในท่อขยายหน้าตัดเพิ่มขึ้นแล้วพุ่งชนพื้นผิวทันที ซึ่ง จะแตกต่างจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำ อากาศแบบ 4 รู (รูปที่ 5(b), 5(e) และ 5(h)) จะมีการดึง (Entrainment) ของอากาศบริเวณด้านหลังท่อขยายหน้า ตัดใหญ่เข้ามาผสมกับเจ็ทเพิ่มขึ้น และลดลงตามเงื่อนไข ที่ระยะพุ่งชนเพิ่ม สำหรับท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรู เหนี่ยวนำอากาศแบบ 8 รู (รูปที่ 5(c), 5(f) และ 5(i)) อากาศรอบๆเจ็ททั้งบริเวณด้านหลังและด้านหน้าของท่อ ขยายหน้าตัดจะถูกดึง (Entrainment) เข้ามาผสมกับเจ็ท

ภายในท่อหน้าตัดใหญ่เพิ่มขึ้นกว่าเงื่อนไขท่อขยายหน้า ตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศแบบ 4 รู ที่เงื่อนไข เดียวกัน ก่อนเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว การดึงอากาศภายนอกเข้า มาผสมกับเจ็ทจะเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนภายในเจ็ท ก่อนพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งมีผลต่อบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่ง ชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ เจ็ทจากท่อเปล่า (ดูจากค่า nusselt จำนวนเบอร์บริเวณ ศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน ในรูปที่ 6)



รูปที่ 5 แสดงเส้นทางการความเร็ว (Streamlines) ของเจ็ทอากาศบนแกน Y-Z ตรงกลางเจ็ท ($Re=20,000$)

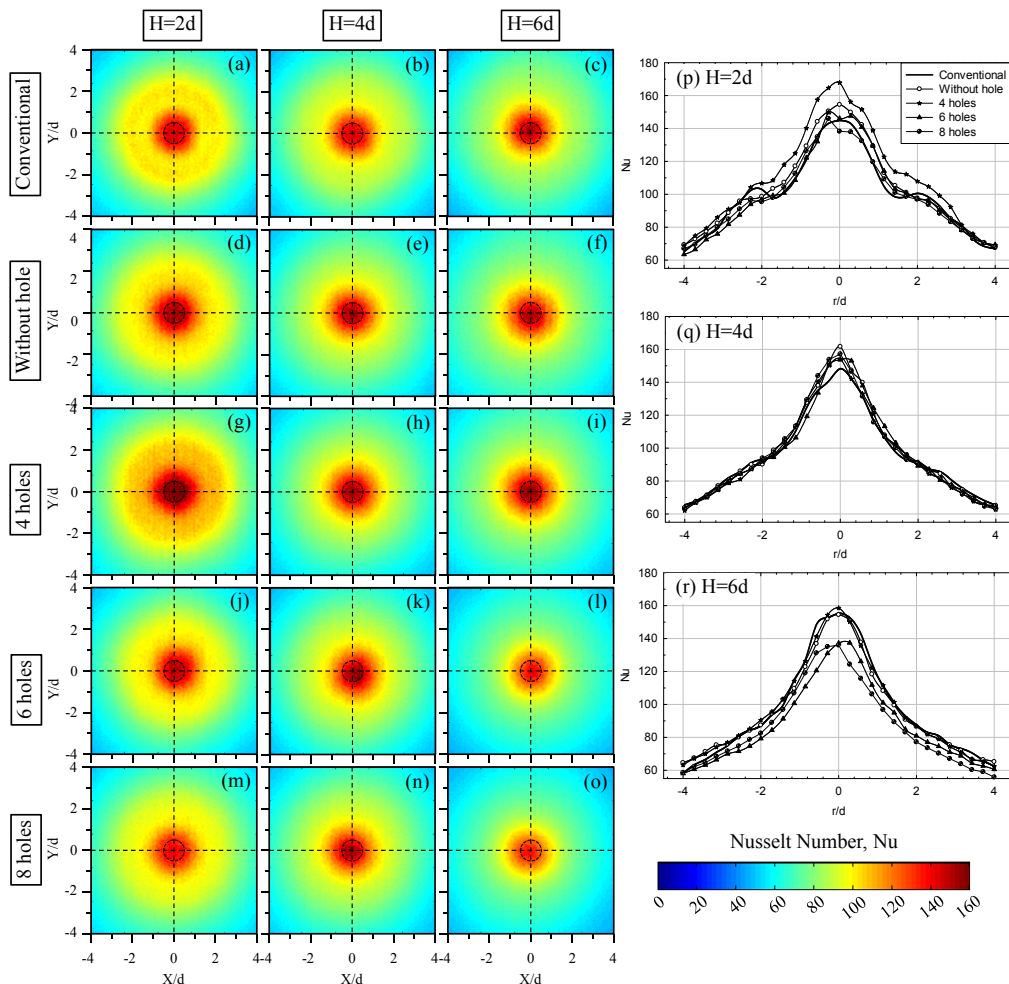
4.2 คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายของนัสเซิลต์บน พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนกรณี $H=2d$, $H=4d$ และ $H=6d$ โดย ภาพรวมนัสเซิลต์มีค่าสูงบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ท พุ่งชน และจะค่อยๆลดลงตามแนวรัศมี สำหรับกรณีของ เจ็ทจากท่อเปล่าที่ระยะ $H=2d$ (รูปที่ 6(a)) จะปรากฏ บริเวณที่มีค่า nusselt สูงสุดอยู่สองตำแหน่งคือ บริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน และอยู่ในช่วงบริเวณ X/d , $Y/d=\pm 2$ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปสำหรับ

กรณีในระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนอยู่ ในช่วงที่ต่ำ [7] ในกรณีของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่มี การเจาะรูเหนี่ยวนำของอากาศแบบ 4 รู (รูปที่ 6(g)) จะ ปรากฏบริเวณที่มีค่า nusselt สูงสุดอยู่สอง ตำแหน่งเช่นเดียวกับเจ็ทท่อเปล่า แต่ในกรณีของเจ็ทจาก ท่อขยายหน้าตัด (รูปที่ 6(d), 6(j) และ 6(m)) จะไม่ ปรากฏบริเวณค่า nusselt สูงสุดลำดับที่สอง โดยค่า nusselt สูงสุดจะปรากฏบริเวณ ศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเพียงแค่อันเดียว

จากรูปที่ 6(p), 6(q) และ 6(r) ตามลำดับ เจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดบางกรณีสามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า โดยเฉพาะบริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (อยู่ในช่วง $X/d, Y/d = \pm 2.5$) ในกรณีระยะพุ่งชน $H=2d$ ที่เงื่อนไขท่อขยายหน้าตัดที่ไม่มีการเจาะรูเหนือวนอากาศ (รูปที่ 6 (d)) และกรณีท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนอากาศแบบ 4 รู (รูปที่ 6 (g)) ให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 6.60% และ 15.86% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเจ็ทท่อเปล่า ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดก่อนพุ่งชนพื้นผิวมีค่าสูงกว่าเจ็ทท่อเปล่า

สำหรับระยะพุ่งชนที่เงื่อนไข $H=4d$ ท่อขยายหน้าตัดแบบไม่มีการเจาะรูเหนือวนอากาศให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 9.01% และกรณีท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนอากาศแบบ 8 รู ให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 5.98% เมื่อเทียบกับเจ็ทท่อเปล่า ส่วนกรณีที่ระยะพุ่งชน $H=6d$ (ในรูปที่ 6(r)) ท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือวนอากาศแบบ 4 รู ให้ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนสูงกว่า 2.01% เมื่อเทียบกับเจ็ทท่อเปล่าแต่กรณีอื่นๆ ให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต่ำกว่าเจ็ทท่อเปล่า



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายของสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

กรณี $H=2d, 4d$ และ $6d$ ($Re=20,000, T_j=27^\circ C$)



5. สรุปผลการทดลอง

1. ผลของการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ มีส่วนช่วยให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า โดย ขึ้นอยู่กับตัวแปรระยะ H แต่สำหรับกรณี que ที่เพิ่มการเจาะรูเหนือหน้าอากาศบางกรณีก็ไม่สามารถช่วยให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเจ็ทท่อเปล่า $H=6d$ ไม่มีส่วนช่วยให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเจ็ทจากท่อเปล่าทุกกรณี ที่ เงื่อนไขจำนวนการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ และระยะพุ่งชน ยกเว้นท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ แบบ 4 รู

2. โดยภาพรวมของผลการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนต่ำ ($H=2d$) ให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าที่ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนสูง ($H=4d, 6d$)

3. เจ็ทจากท่อขยายหน้าตัดสามารถถึงอากาศรอบๆ เข้ามาผสมได้มากกว่าเจ็ทจากท่อเปล่า อากาศที่อยู่รอบๆ จะถูกดึงเข้ามาผสมกับเจ็ทมากขึ้น มีผลต่อบริเวณศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ เพิ่มขึ้น

4. เจ็ทท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเจ็ทท่อเปล่า สำหรับกรณี $H=2d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 15.86%, 6.60% สำหรับท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศแบบ 4 รู และท่อขยายหน้าตัดที่ไม่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ ตามลำดับ ส่วนกรณี $H=4d$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 9.01%, 5.98% สำหรับท่อขยายหน้าตัดที่ไม่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศ และท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนือหน้าอากาศแบบ 8 รู

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาสถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, X. K., Chue, L. P. and Yu, S. C. M. (2003). On the Near-field of a Square Jet with Vortex-generating Tabs, *Fluid Dynamics Research*, vol. 32, pp.99-117.
- [2] Nathan, G. J., Mi, J. Alwahabi, Z. T., Newbold, G. J. R., and Nobes, D. S. (2006). Impacts of a Jet's Exit Flow Pattern on Mixing and Combustion Performance, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 32, pp.496-538.
- [3] Nathan, G. J., Hill, S. J. and Luxton, R. E. (1998). An Axisymmetric 'Fluidic' Nozzle to Generate Jet Precession, *J. Fluid Mech*, vol. 370, pp.347-380.
- [4] Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K. and Whitney, C.F. (1997). Velocity and Turbulence Characteristics of a Semiconfined Orthogonally Impinging Slot Jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 14, pp.60-67.
- [5] Zhou, D. W. and Lee, S. J. (2004). Heat Transfer Enhancement of Impinging Jets Using Mesh Screens, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp.2097-2108.
- [6] Zuckerman, N. and Lior, N. (2006). Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, Numerical Modeling, *Advances Heat Transfer*, vol. 39 pp.565-631.
- [7] Viskanta, R. (1993). Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 6, pp.111-134.

ภาคผนวก ข.

บทความสำหรับเผยแพร่ 2

“Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Expansion Pipe Nozzle
with Air Entrainment Holes”

The 5th KKU International Engineering Conference 2014

Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Expansion Pipe Nozzle with Air Entrainment Holes

Natthaporn Kaewchoothong^{1,a}, Makatar Wae-hayee^{1,b},
Passakorn Vessakosol^{1,c}, Banyat Niyomwas^{1,d} and Chayut Nuntadusit^{1,e*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla, Thailand
^atong_18910@hotmail.com, ^bwaehayee@gmail.com,
^cpassakornv@hotmail.com, ^dbanyat@engineer.com, ^echayut@me.psu.ac.th

Keywords: Impinging jet, Expansion pipe nozzle, Heat transfer enhancement, Flow characteristic, Air entrainment holes

Abstract

Flow and heat transfer characteristics of impinging jet from expansion pipe were experimentally and numerically investigated. The expansion pipe nozzle was drilled on expansion wall for increasing an entrainment of ambient air into a jet flow. The diameter of round pipe nozzle was $d=17.2$ mm and the diameter of expansion pipe was fixed at $D=68.8$ mm ($=4d$). The number of air entrainment holes was varied at 4, 6 and 8 holes, and the expansion pipe length was examined at $L=2d$, $4d$ and $6d$. In this study, the expansion pipe exit-to-plate distance was fixed at $H=2d$ and the Reynolds number of jet was studied at $Re=20,000$. Temperature distribution on the impinged surface was acquired by using an infrared camera. The numerical simulation was carried out to reveal the flow field. The results show that the ambient air enters through the holes and subsequently blocked the entrainment of ambient air into the jet flow. It causes to enhance the heat transfer particularly at stagnation point higher than the case of conventional pipe: 4.68% for 4 holes at $L=2d$, 6.4% and 6.28% for 4 holes and without holes at $L=4d$ and 5.48% for 8 holes at $L=6d$.

Introduction

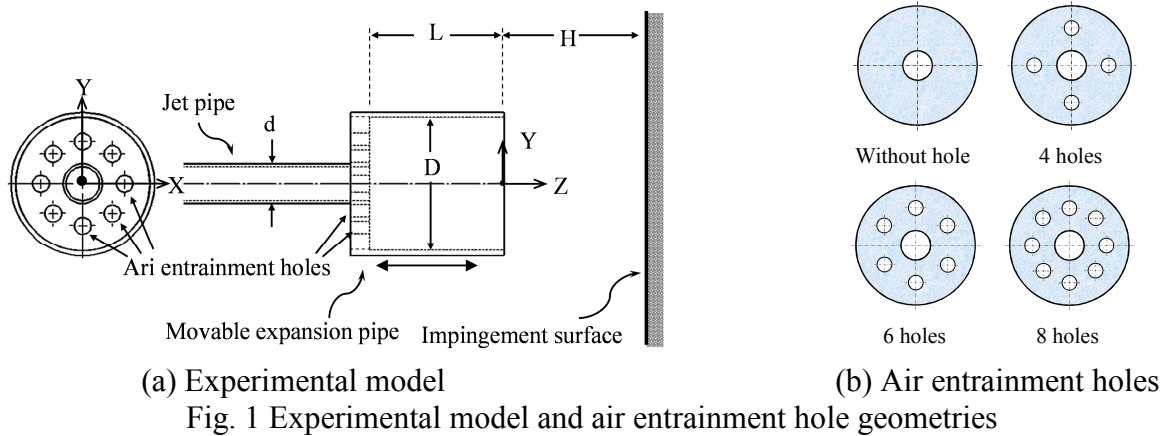
The characteristics of jets such as entrainment, mixing and spreading are closely related to the heat transfer characteristics of impinging jets on surface. For circular jet, large-scale axisymmetric and streamwise vortices are important factors to entrain ambient fluid into the jet flow. There are many passive control methods to enhance the entrainment, mixing and spreading in jet such as addition tabs and modification at the jet outlet [1, 2], generation of swirling and processing jet flow [3, 4].

Another simple method for jet flow control is using extending nozzle outlet. Usually, the expansion pipe is used for enhancing of jet mixing or combustion in industrial applications. It is also possible to employ for impinging jet. The main concept for heat transfer enhancement has been discussed in previous studies with increasing turbulent intensity in the jet flow [5]. So, it is possible to apply the expansion pipe for promoting the heat transfer on impinged surface.

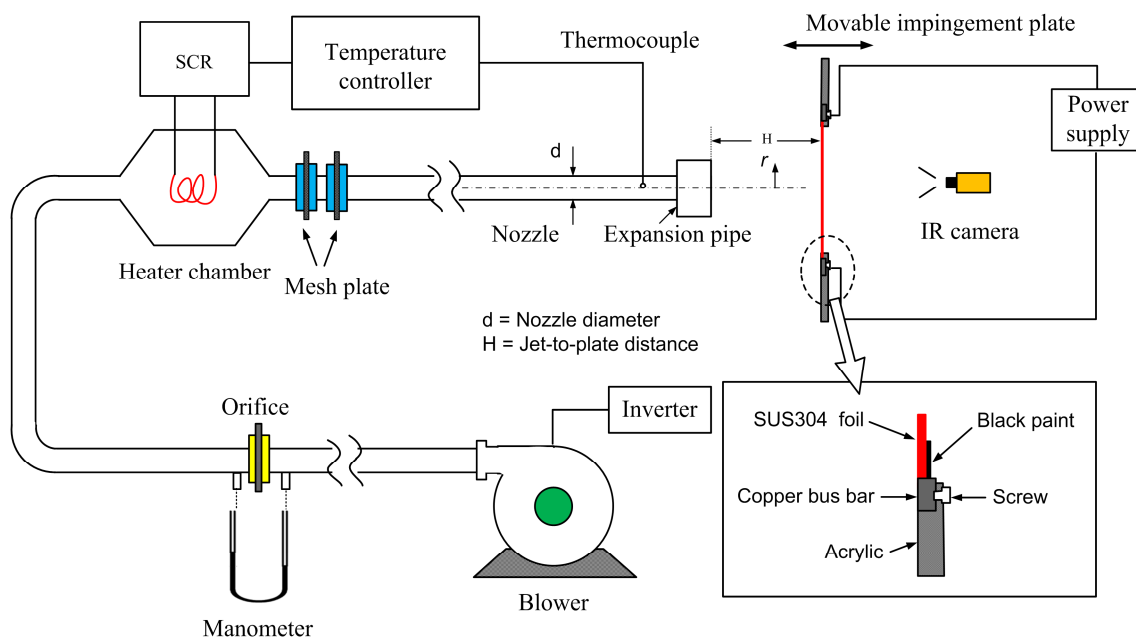
The objective of this study is to investigate flow and heat transfer characteristics of an impinging jet from expansion pipe. In addition, the expansion pipe was drilled with air entrainment holes in order to increase the flow rate and turbulent intensity of jet flow. The effect of number of air entrainment holes and the expansion pipe length were experimentally and numerically investigated.

Experimental Setup and Method

Experimental Model and Parameters. The experimental model of impinging jet with expansion pipe is shown in Fig. 1(a). The jet was discharged from pipe nozzle and then impinged normal to the wall. The expansion pipe was assembled at the end of pipe nozzle. The origin of the Cartesian coordinates was located at the centre of jet outlet. The Z-axis is on the axial of jet, and X-, Y-axis are on the horizontal and vertical axis as show in Fig. 1(a).



In order to study the effects of air entrainment holes, the expansion pipe plate was drilled for case of 4, 6 and 8 holes with the diameter of 8.6 mm, and the locations of the holes were evenly distributed at $r=D/4$ as shown in Fig. 1(b). The inner diameter of round pipe and the inner diameter of expansion pipe were $d=17.2$ mm and $D=68.8$ mm ($=4d$), respectively. The jet-to-plate distance was fixed at $H=2d$; the expansion pipe length was varied at $L=2d$, $4d$ and $6d$. The impinging jet from conventional pipe (without expansion pipe) was also studied to compare the results with the case of mounted expansion pipe. The comparison of flow and heat transfer characteristics was based on the constant jet mass flow rate corresponding to $Re=20,000$.



Experimental Setup. The diagram of experimental setup is shown in Fig. 2. Air was supplied by a blower through a calibrated orifice for measuring flow rate. The flow rate was adjusted by changing rotating speed of blower with inverter. Jet air temperature was controlled by a temperature controller and a power controller at $27^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$. The nozzle was made of steel pipe with inner diameter of $d=17.2$ mm and length of $83d$. This pipe length was ensured the fully developed flow at nozzle exit. The jet impinged surface was made of stainless foil with sizing $240\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ and 0.03 mm in thickness. This stainless foil was tightly stretched between two copper bus bars. The stainless foil was sprayed with dark black color for measurement temperature with infrared camera. The emissivity on measured surface is 0.95.

Data Reduction. The air jet with constant temperature discharging from the pipe nozzle impinged normal to the heated surface for cooling. The wall temperature on the impingement

surface was measured by using the infrared camera and, the heat transfer coefficient was subsequently evaluated.

The local Nusselt number was calculated from:

$$Nu = \frac{hd}{k}, \quad (1)$$

where, d is the inner diameter of the pipe nozzle and k is a thermal conductivity of the air jet. The heat transfer coefficient, h , can be calculated from

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{losses}}{T_w - T_{aw}}, \quad (2)$$

where, \dot{q}_{losses} is the heat transfer losses from free convection and radiation [6], T_w and T_{aw} are the wall temperature with heat flux and the adiabatic wall temperature without heat flux, respectively. The heat flux can be evaluate from

$$\dot{q}_{input} = \frac{IV}{A}, \quad (3)$$

where, I is the electric current, V and A are the voltage and the area of heat transfer wall.

Numerical Simulation

Flow characteristics of the impinging jet with expansion pipe were studied by commercial software (ANSYS ver.13.0, Fluent). The numerical model was same to the experimental model in geometries, dimensions, and flow boundary conditions. Computations were conducted by solving Reynolds averaged continuity and Navier-stokes equations. SST $k-\omega$ turbulence model has been adopted in solving turbulent flow. The non-uniform grid system was finely generated for regions near the jet exit and the impingement surface. The number of generated grid was varied to achieve an accurate solution with low computation cost. Solutions were considered to be convergent when the normalized residual of all algebraic equations is less than the prescribed value of 1×10^{-4} [7].

Results and Discussion

Flow characteristics. Streamlines on Y-Z plane passing center of nozzle from CFD results are shown in Fig. 3. It should be noticed that the outlet of expansion pipe was fixed at $Z/d=0$ for every cases. The streamlines for the case of without hole (Fig. 3(a) and (d)) show that the ambient air entrains into the expansion pipe. For the case of expansion pipe with air entrainment holes (Fig. 3(b), (c), (e) and (f)), the ambient air entrains into expansion pipe by two parts: first one through the air entrainment holes and second one entering from the expansion pipe outlet. It can be attributed that the expansion pipe with holes can increase the entrainment of ambient air and subsequently increases the turbulent intensity in jet flow.

In addition, some circulation flows appear inside the expansion pipe; their sizes becomes larger when the expansion pipe length is longer as shown for case of $L=6d$. However, for the case of expansion pipe with 4 holes at $L=2d$ as shown in Fig. 3(b), the circulation flows are disappeared due to entering of ambient air through the air entrainment holes block the ambient air which flow from expansion pipe outlet. For expansion pipe with 8 holes as shown in Fig. 3(c), however, the circulation flows are divided to smaller circulation flows when comparing to the case of expansion pipe without holes (Fig. 3(a)).

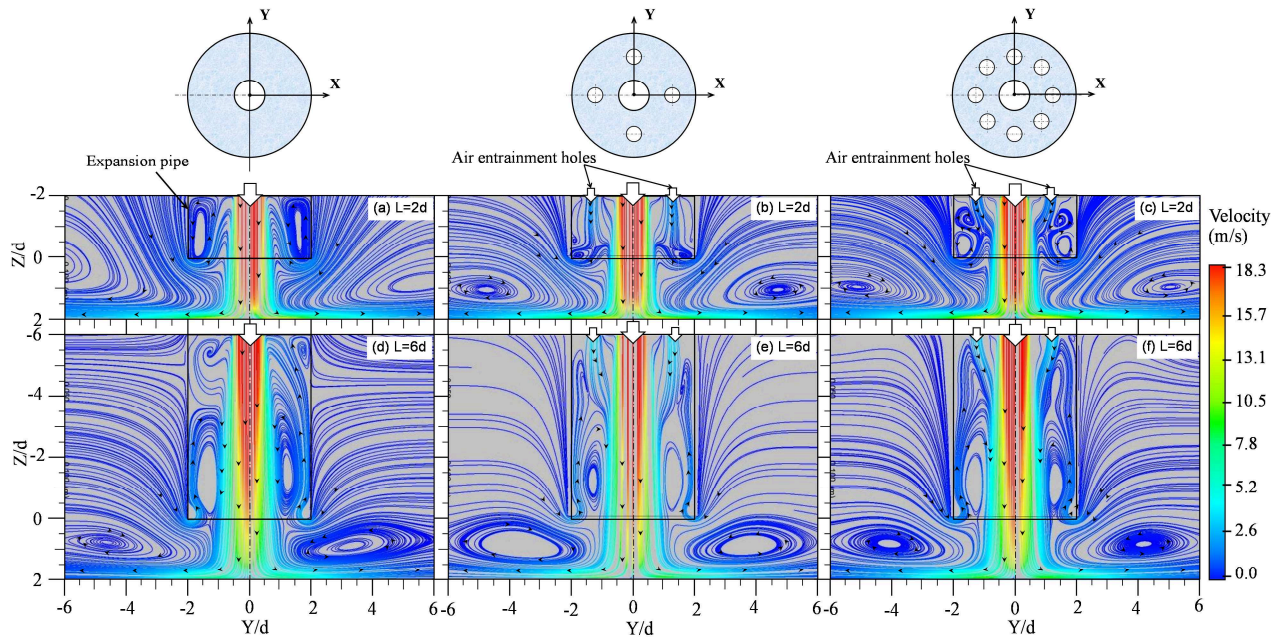


Fig. 3 Streamlines of jet and ambient air on Y-Z plane at centre of nozzle (CFD results, $Re=20,000$)

Heat transfer characteristics. Nusselt number contours and local Nusselt number distributions on the impingement surface are shown in Fig. 4. Nusselt number is also compared with those from the previous work for case of conventional pipe nozzle [8] as shown in Fig. 4(p). The Nusselt number distributions are highest at stagnation point and decreases gradually along radial direction. For all case of expansion pipe, the secondary peak is disappeared except for expansion pipe with 4 holes at $L=2d$ as shown in Fig. 4(d). For case of short expansion pipe $L=2d$, the number of air entrainment holes shows strong effect on Nusselt number distribution in impingement region and wall region. But, the effect of holes number becomes small for case of long expansion pipe $L=4d$ and $6d$.

The Nusselt number at stagnation point for some cases of the expansion pipe is higher than the case of conventional pipe: 4.68% for 4 holes at $L=2d$, 6.4% and 6.28% for 4 holes and without hole at $L=4d$ and 5.48% for 8 holes at $L=6d$. This can be attributed that the increase of turbulent intensity of jet flows causes to increase heat transfer near stagnation point. However, when consider at area around impingement regions, the Nusselt number distributions for all cases of expansion pipe are lower than the case of conventional pipe.

Conclusions

The main results of this study can be concluded as follow:

1. For the case of expansion pipe with hole, the ambient air entrains into the jet flow through the holes and the expansion pipe outlet. It can be attributed that the turbulent intensity of jet increases before impingement.

2. Some of the expansion pipe cases can increase Nusselt number near stagnation point which higher than the case of conventional pipe: 4.68% for 4 holes at $L=2d$, 6.4% and 6.28% for 4 holes and without hole at $L=4d$, and 5.48% for 8 holes at $L=6d$.

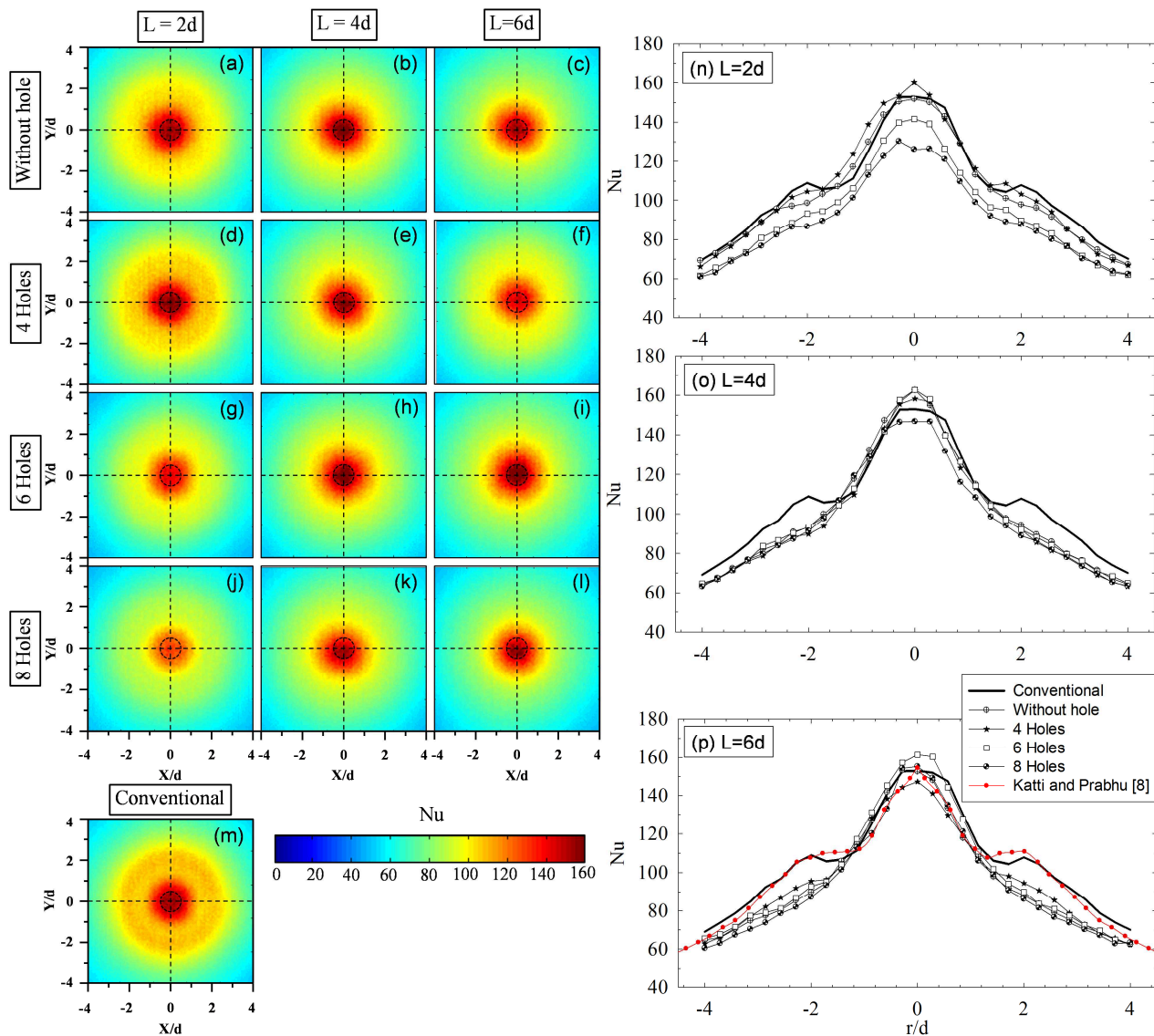


Fig. 4 (Left column) Nusselt number contours on the impingement surface and (Right column) local Nusselt number distributions along radial axis at jet center (Experimental results, $H=2d$, $Re=20,000$, $T_j=27^\circ\text{C}$)

References

- [1] X. K. Wang, L. P. Chue, S. C. M. Yu, On the Near-field of a Square Jet with Vortex-generating Tabs. *Fluid Dyn. Res.*, 32 (2003) 99-117.
- [2] J. Lee, S.-J. Lee, The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heat Transfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 43 (2000) 555-575.
- [3] L. Huang, M.S. El-Genk, Heat Transfer and Flow Visualization Experiments of Swirling, Multi-Channel, and Conventional Impinging Jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41(1998) 583–600.
- [4] G. J. Nathan, J. Mi, Z. T. Alwahabi, G. J. R. Newbold, D. S. Nobes, Impacts of a Jet's Exit Flow Pattern on Mixing and Combustion Performance. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 32 (2006) 496-538.
- [5] S. Ashforth-Frost, K. Jambunathan, C.F. Whitney, Velocity and Turbulence Characteristics of a Semiconfined Orthogonally Impinging Slot Jet. *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 14 (1997) 60-67.
- [6] C. Nuntadusit, M. Wae-hayee, P. Tekasakul, S. Eiamsa-ard, Local heat transfer characteristics of array impinging jets from elongated orifices. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 39 (2012) 1154-1164.
- [7] N. Zuckerman, N. Lior, Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, Numerical Modeling, *Advances Heat Transfer*, 39 (2006) 565-631.
- [8] V. Katti, S. V. Prabhu, Experimental study and theoretical analysis of local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet from a circular straight pipe nozzle, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 51 (2008) 4480–4495.

ภาคผนวก ค.

สิทธิบัตร (Patent)

“ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก”

สิทธิบัตรไทย (Thai patent), (กำลังยื่นขอ)

รายละเอียดของการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก
สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- 5 วิศวกรรมเครื่องกลที่เกี่ยวข้องกับระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วย
เจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก

ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

- การให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวโดยบังคับให้เจ็ทของไหล (ลำของไหลที่มีความเร็ว) ไหลปะทะหรือพุ่งชนพื้นผิวเป็นวิธีการที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย และถูกนำไปประยุกต์ใช้ใน
10 อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้อัตราการ
ถ่ายเทความร้อนที่สูง จึงถูกนำไปใช้งานที่ต้องการถ่ายเทความร้อนที่สูงหรือรวดเร็ว เช่น ใช้ระบาย
ความร้อนในระบบการผลิตโลหะแผ่น (U.S. Patent No. 5,407,133) ใช้ในอุปกรณ์ถ่ายเทความ
ร้อนที่มีขนาดเล็กและประสิทธิภาพสูง (U.S. Patent No. 4,494,171) ใช้ระบายความร้อนในใบพัด
เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ (U.S. Patent No. 5,533,864) หรือผนังห้องเผาไหม้เครื่องยนต์แก๊สเทอร์
15 ไบน์ (U.S. Patent No. 6,000,908) นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่
ต้องการอบให้ความร้อนแบบรวดเร็วและต้องการอัตราการผลิตที่สูง (U.S. Patent No. 4,462,383,
U.S. Patent No. 2008/017,8613-A1) อย่างไรก็ตามวิธีการใช้เจ็ทไหลปะทะหรือเจ็ทพุ่งชนมี
ข้อจำกัดคือ ต้องใช้เจ็ทที่มีความเร็วสูง จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานในการขับปั๊มหรือพัดลมที่สูงตาม
ไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นโดยที่พลังงานใน
20 การขับปั๊มหรือพัดลมเท่าเดิม

- การควบคุมการไหลของเจ็ทเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ท
พุ่งชนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีควบคุมการไหลแบบใช้พลังงาน (Active control) เป็นการ
ควบคุมการไหลโดยอาศัยพลังงานจากภายนอกมากระตุ้นการไหลของเจ็ทโดยใช้ตัวกระตุ้น
(Actuator) เช่น การหมุนวาล์วเพื่อให้เจ็ทเกิดการไหลแบบสั้น (U.S. Patent No. 6,053,203) การ
25 เคลื่อนที่ของคู่ลูกสูบเพื่อให้เกิดการอัดและดูดอากาศกลับไปมาในตู้อบระบบเจ็ทความร้อน (U.S.
Patent No. 6,320,165) หรือการใช้เจ็ทแบบสังเคราะห์ (Synthetic jet) เพื่อควบคุมลักษณะการ
ไหลของเจ็ท (U.S. Patent No. 5,894,990) อย่างไรก็ตามวิธีตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีข้อเสียคือ
จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาที่ดี และมีข้อจำกัดในด้านความทนทาน ไม่สามารถใช้งานที่สภาวะ
อุณหภูมิสูงได้ ส่วนวิธีควบคุมการไหลแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive control) เป็นการควบคุมการ

ไหลแบบไม่อาศัยพลังงานจากภายนอก ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว แต่จะใช้อุปกรณ์บางอย่างติดตั้งเพื่อ
เปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของเจ็ท เช่น การปรับแต่งปากทางออกเจ็ทโดยการเจาะร่องเพื่อให้
สามารถดึงอากาศรอบๆให้เข้ามาผสมกับเจ็ทได้มากขึ้น (U.S. Patent No. 5,992,763) การ
ประยุกต์เจ็ทแบบไหลในแนวรัศมีใช้ในตู้อบ (U.S. Patent No. 2011/0,126,818-A1) การออกแบบ
5 ให้แผ่นออริฟิสมีลักษณะเป็นลอนเพื่อลดผลของกระแสไหลตัดที่ไหลระหว่างแผ่นออริฟิสและ
ผนังที่เจ็ทพุ่งชน (U.S. Patent No. 5,467,815-A) เป็นต้น วิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่ต้องการอุปกรณ์
ควบคุมที่ซับซ้อน ราคาถูกสามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม

ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อที่
10 ติดตั้งปลอกท่อที่ประกอบด้วยท่อเจ็ท ปลอกท่อและพื้นผิวที่ต้องการถ่ายเทความร้อนโดย พื้นผิวที่
ใช้ในการถ่ายเทความร้อนวางอยู่ด้านหน้าปากทางออกเจ็ทในลักษณะที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ
เจ็ท เมื่อของไหลไหลออกจากปากทางออกท่อเจ็ทจะปะทะพื้นผิวที่ต้องการถ่ายเทความร้อน
ตำแหน่งส่วนปลายของปากทางออกท่อเจ็ทมีการติดตั้งปลอกท่อรูปทรงกระบอก วางในแนวที่มีจุด
ศูนย์กลางร่วมกันระหว่างท่อเจ็ทและปลอกท่อ เพื่อควบคุมการดึงของไหลที่อยู่รอบๆเข้ามาผสมกับ
15 การไหลของเจ็ทและไหลปะทะพื้นผิวถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้ คือ เพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดย
การติดตั้งปลอกท่อที่ปากทางออกท่อเจ็ท ซึ่งสามารถดึงของไหลรอบๆเข้ามาผสมกับการไหลของเจ็ท
ได้มากขึ้น เป็นวิธีการควบคุมการไหลของเจ็ทแบบไม่ใช้พลังงาน สามารถออกแบบและสร้างได้
ง่าย การประดิษฐ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบระบายความร้อน และระบบให้ความร้อนที่มี
20 ประสิทธิภาพสูงได้ โดยการเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เช่น การระบายความ
ร้อนแผ่นโลหะในโรงงานอุตสาหกรรม การระบายความร้อนของใบพัดแก๊สเทอร์ไบน์ การระบาย
ความร้อนในชุดอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบหัวฉีดผสมสารเคมี การออกแบบตู้อบหรือออกแบบหัว
เผาที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นต้น

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

25 ตามรูปที่ 1 แสดงแผนภาพระบบสำหรับให้ความร้อนหรือระบายความร้อน ที่ประกอบด้วย
ท่อเจ็ท (1) หน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน d ทำหน้าที่เป็นหัวฉีดสำหรับพ่นเจ็ทของ
ไหลให้ไหลปะทะพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (2) โดยท่อเจ็ท (1) วางอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวถ่ายเท
ความร้อน (2) ที่ส่วนปลายของท่อเจ็ท (1) มีการติดตั้งปลอกท่อ (3) ทำหน้าที่ควบคุมการดึงของ
ของไหลที่อยู่รอบๆเข้ามาผสมกับการไหลของเจ็ท โดยปลอกท่อ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอยู่ในช่วง $2d \leq D \leq 8d$ และความยาวอยู่ในช่วง $1d \leq L \leq 6d$ ยึดติดกับ
 แขนจับยึด (4) มีระยะจากปากทางออกของปลอกท่อ (3) ถึงพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (2) อยู่ในช่วง
 $2d \leq S \leq 6d$ รูปที่ 2 แสดงแผนภาพของระบบสำหรับให้ความร้อนหรือระบายความร้อน เมื่อมองจาก
 ด้านหน้าของรูปที่ 1 จากรูปท่อเจ็ท (1) และปลอกท่อ (3) ถูกวางอยู่ในแนวแกนที่มีจุดศูนย์กลาง
 5 ร่วมกัน ระบบสำหรับให้ความร้อนหรือระบายความร้อนนี้สามารถใช้ได้ในกรณีของไหลเป็น
 ประเภทน้ำหรืออากาศ ในช่วงที่ความเร็วของไหลจากท่อเจ็ทน้อยกว่าความเร็วเสียงในของไหล

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่
 เจ็ทอากาศไหลปะทะพื้นผิวเรียบเพื่อระบายความร้อน ชุดทดลองนี้ประกอบด้วยโบลเวอร์ (5) ใช้
 สำหรับดูดอากาศในห้องทดลองแล้วส่งผ่านไปยังออร์ริฟิส (6) เพื่อวัดอัตราการไหลของอากาศโดย
 10 ใช้มานอมิเตอร์ (7) วัดผลต่างความดันที่เกิดขึ้น จากนั้นอากาศไหลผ่านห้องควบคุมอุณหภูมิ (8)
 ที่มีการติดตั้งฮีตเตอร์ (9) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่โดยชุดควบคุมอุณหภูมิ (10) ที่มี
 การตรวจจับอุณหภูมิเจ็ทในท่อเจ็ท (1) ด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล (12) จากนั้นอากาศที่ถูกควบคุม
 อุณหภูมิจะไหลผ่านตะแกรงสองชั้น (11) เพื่อบังคับให้อุณหภูมิของอากาศสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด
 ท่อ ก่อนที่จะไหลออกที่ปากทางออกท่อเจ็ท (1) และพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (2)
 15 ซึ่งพื้นผิวนี้อาจสามารถเลื่อนตามแนวแกนท่อเจ็ทเพื่อให้สามารถปรับระยะจากปากทางออกเจ็ทถึง
 พื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

ในการวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (2) ได้ใช้ผนังที่ทำจาก
 แผ่นสแตนเลสบางที่มีความหนา 0.03 mm ซึ่งติดกับกรอบที่ทำจากแผ่นพลาสติกด้วยแท่งทองแดง
 2 แท่ง จากนั้นได้ใช้ชุดจ่ายไฟกระแสตรง (14) จ่ายกระแสไฟฟ้าให้เกิดฟลักซ์ความร้อนกระจายทั่ว
 20 ทั้งพื้นผิวแผ่นสแตนเลส โดยบังคับให้เจ็ทที่มีอุณหภูมิตั้งที่ (ประมาณอุณหภูมิห้อง) ไหลปะทะ
 พื้นผิวที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เพื่อทำการระบายความร้อนบนพื้นผิว เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
 ได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (13) บันทึกการกระจายอุณหภูมิตั้งที่พื้นผิวด้านหลังแผ่นสแตนเลส
 จากนั้นนำข้อมูลการกระจายอุณหภูมิตั้งที่พื้นผิวดังกล่าวคำนวณหาอัตราเฉลี่ยของความร้อนที่กระจายบน
 พื้นผิวถ่ายเทความร้อน (2) โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและนัสเซิลต์นัมเบอร์แต่ละจุดบน
 25 พื้นผิว สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h = \frac{\dot{q}_{input} - \dot{q}_{losses}}{T_w - T_j}$$

และ

$$Nu = \frac{hd}{k}$$

โดยที่ \dot{q}_{input} คือฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส คำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส (กระแสไฟฟ้าคูณกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแท่งทองแดง) หารด้วยพื้นที่ผิวของแผ่นสแตนเลส ($= IV / A$) \dot{q}_{losses} คือฟลักซ์ความร้อนจากแผ่นสแตนเลสที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีสู่บรรยากาศ T_w คืออุณหภูมิบนพื้นผิวแผ่นสแตนเลสที่วัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน T_j คืออุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่ออกจากหัวฉีด d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อหัวฉีด และ k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเจ็ทอากาศ

กราฟที่ 1, กราฟที่ 2 และกราฟที่ 3 แสดงการกระจายนั้สเซลต์นั้มเบอร์ในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวปลอกท่อ L และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกท่อ D ที่ระยะจากปลายปลอกท่อถึงพื้นผิวถ่ายเทความร้อน $S=2d, 4d$ และ $6d$ ตามลำดับ ในการทดลองได้ใช้ท่อเจ็ทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $d = 17.2 \text{ mm}$ โดยทุกการทดลองเปรียบเทียบที่เงื่อนไขอุณหภูมิเจ็ท $T_j = 27^\circ\text{C}$ และเรย์โนลด์ส นั้มเบอร์ของเจ็ท ($Re = V_j d / \nu$ โดยที่ V_j คือความเร็วของเจ็ทอากาศ และ ν คือความหนืดเชิงจลน์ของเจ็ทอากาศ) เท่ากับ 20,000 และ $r/d=0$ เป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนบนพื้นผิว และในแต่ละกราฟได้แสดงผลของกรณีท่อเจ็ทที่ไม่ติดตั้งปลอกท่อ (Conventional) เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งปลอกท่อสวม จากกราฟทั้งสามพบว่าทุกเงื่อนไขการทดลองมีลักษณะการกระจายของนั้สเซลต์นั้มเบอร์ที่คล้ายกัน คือ ค่านั้สเซลต์นั้มเบอร์มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทไหลพุ่งชน ($r/d=0$) และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวรัศมีที่ห่างออกจากจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน

จากผลของรูปร่างปลอกท่อที่มีต่อค่านั้สเซลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิว สามารถสรุปได้ดังนี้ ในกรณีที่มีความยาวปลอกท่อ $L=1d$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกสวม D มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่านั้สเซลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวน้อยมากไม่แตกต่างจากกรณีของท่อแบบไม่ติดตั้งปลอกสวม โดยเฉพาะเงื่อนไขที่ระยะ $H=3d$ และ $5d$ แต่เงื่อนไขที่ระยะ $H=7d$ พบว่าค่านั้สเซลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวกรณีติดตั้งปลอกท่อมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อเพียงเล็กน้อย

ในกรณีที่ติดตั้งปลอกท่อความยาว $L=2d$ พบว่าสามารถช่วยเพิ่มค่านั้สเซลต์นั้มเบอร์บนพื้นผิวที่เจ็ทไหลปะทะได้เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อทั้งบริเวณที่เจ็ทไหลปะทะโดยตรงและบริเวณรอบๆ โดยพบว่ากรณี $H=4d$ ที่เงื่อนไขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกท่อ $D=4d$ ให้ค่านั้สเซลต์นั้มเบอร์สูงสุด รองลงมาคือเงื่อนไข $D=3.3d, 2d$ และ $6d$ ตามลำดับ แต่ที่เงื่อนไข $D=8d$ ให้ค่านั้สเซลต์นั้มเบอร์ใกล้เคียงกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ ในกรณีที่ $H=6d$ พบว่า การ

ติดตั้งปลอกท่อที่เงื่อนไข $D=2d$, $3.3d$ และ $4d$ สามารถเพิ่มค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวได้ ในขณะที่การติดตั้งปลอกท่อที่เงื่อนไข $D=6d$ และ $8d$ ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ต่ำกว่ากรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อเพียงเล็กน้อย และในกรณีที่เพิ่มระยะห่างเป็น $H=8d$ พบว่าการติดตั้งปลอกท่อที่เงื่อนไข $D=2d$, $3.3d$ และ $4d$ ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ติดตั้งปลอกท่อ

5 ในขณะที่การติดตั้งท่อสวมที่เงื่อนไข $D=6d$ และ $8d$ ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งปลอกท่อ

เมื่อเพิ่มความยาวของปลอกท่อเป็น $L=4d$ พบว่า ที่ระยะห่าง $H=6d$ การติดตั้งปลอกท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=4d$ สามารถเพิ่มค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ ในขณะที่เงื่อนไขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกท่ออื่นๆ ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ที่ใกล้เคียงกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ ยกเว้นที่เงื่อนไข $D=8d$ ที่ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ต่ำกว่ากรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ เมื่อเพิ่มระยะห่างเป็น $H=8d$ พบว่า การติดตั้งปลอกท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=4d$ สามารถเพิ่มค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ ในขณะที่เงื่อนไขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกท่ออื่นๆ ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ต่ำกว่ากรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ และเมื่อเพิ่มระยะห่างเป็น $H=10d$ พบว่าการติดตั้งปลอกท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=3.3d$ สามารถเพิ่มค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ ในขณะที่เงื่อนไขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกท่ออื่นๆ ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ที่ใกล้เคียงกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ

10

15

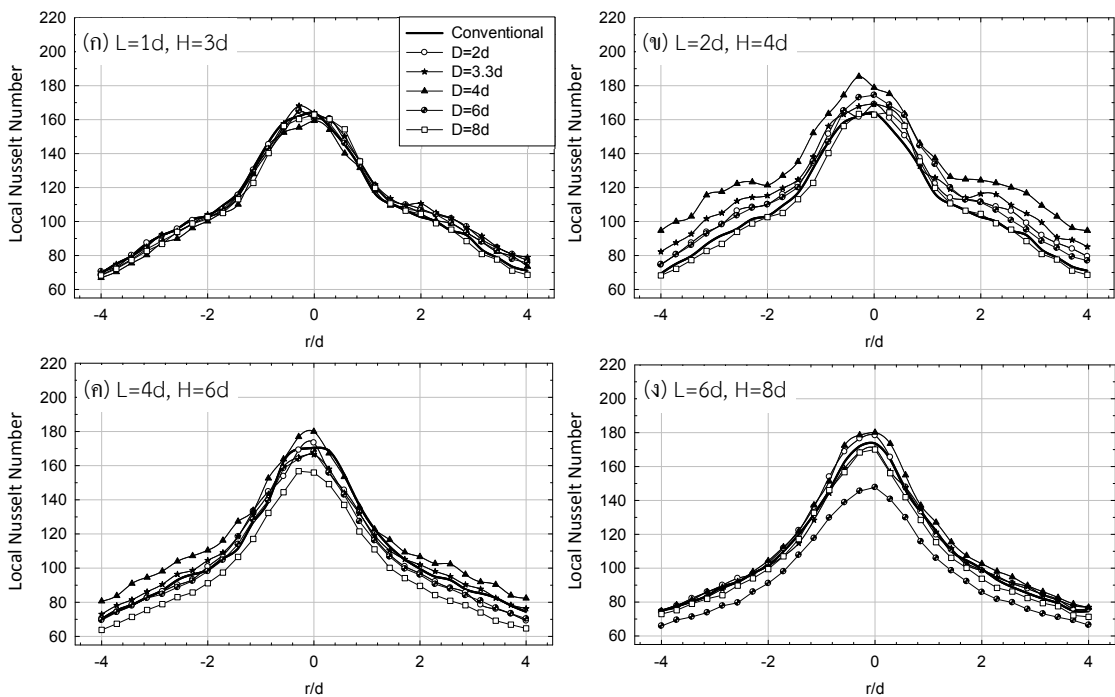
สำหรับเงื่อนไขที่ความยาวปลอกท่อ $L=6d$ พบว่า ที่ระยะห่าง $H=8d$ การติดตั้งปลอกท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=4d$ และ $2d$ สามารถเพิ่มค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์บริเวณที่เจ็ทไหลปะทะโดยตรงได้เพียงเล็กน้อย ในขณะที่เงื่อนไขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอื่นให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ ในขณะที่เงื่อนไข $H=10d$ การติดตั้งปลอกท่อที่เงื่อนไขเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=4d$ สามารถเพิ่มค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ได้เฉพาะบริเวณที่เจ็ทไหลปะทะได้เท่านั้น ในขณะที่เงื่อนไขขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอื่นๆ ให้ค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์ที่น้อยกว่ากรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ แต่เมื่อเพิ่มระยะเป็น $H=12d$ พบว่าการติดตั้งปลอกท่อสามารถช่วยเพิ่มค่าดัชนีเซลด์นัมเบอร์บนพื้นผิวได้เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ ยกเว้นกรณีเงื่อนไข $D=6d$

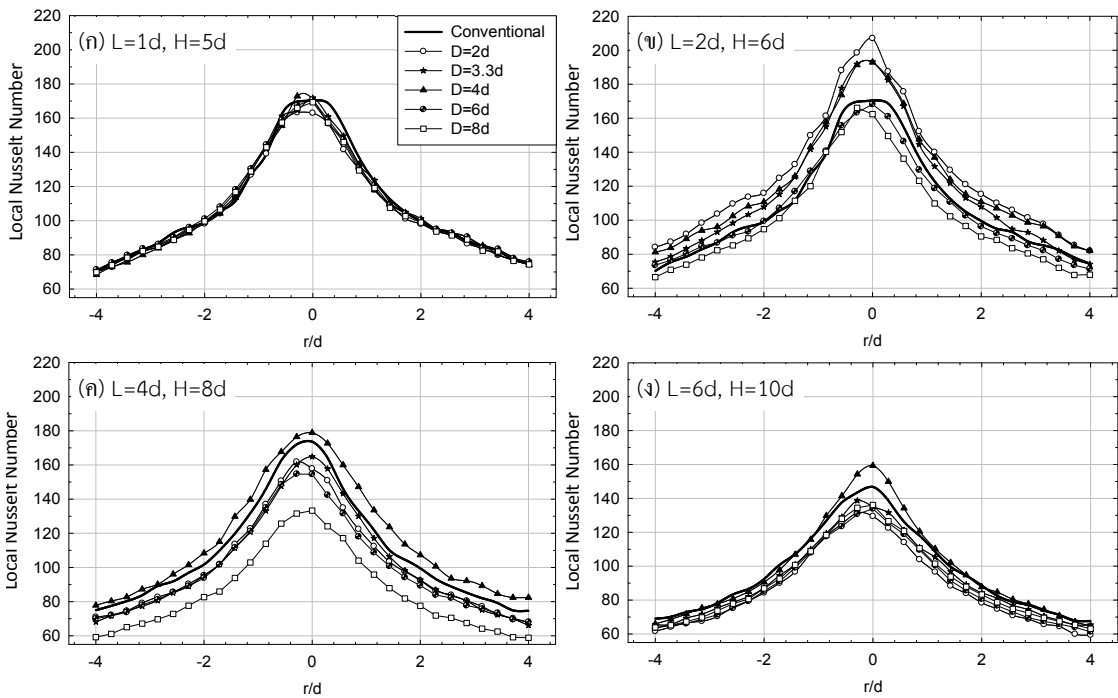
20

25

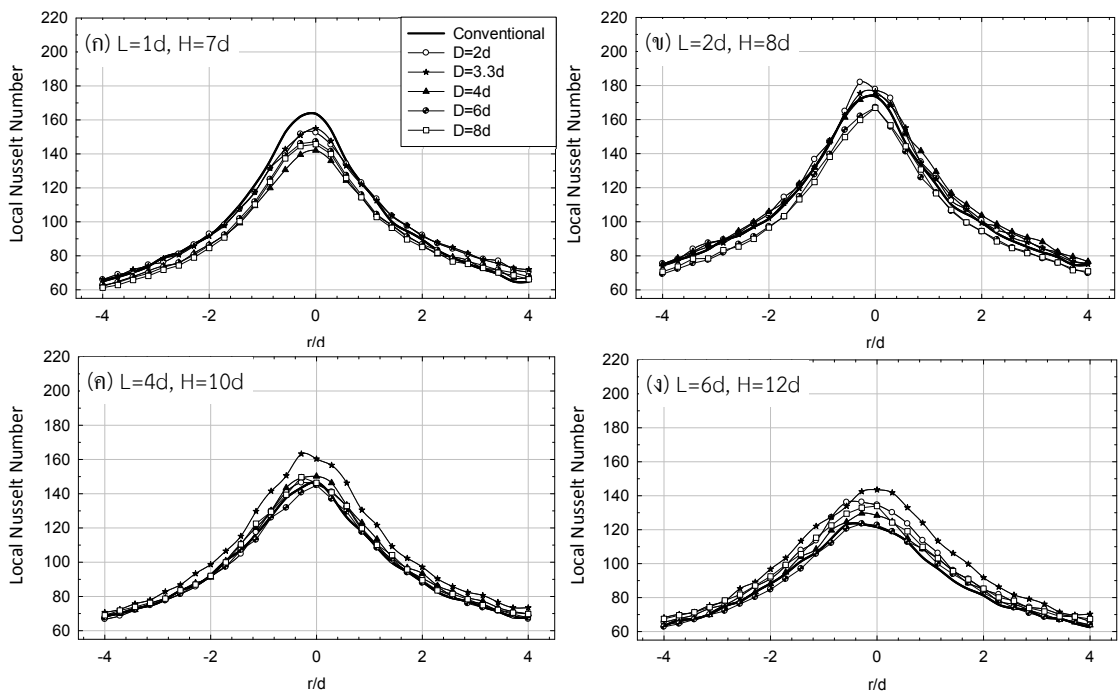
กราฟที่ 4, กราฟที่ 5 และกราฟที่ 6 แสดงค่าเฉลี่ยของดัชนีเซลด์นัมเบอร์ที่คำนวณจากอนุกรมมิเชลล์บนพื้นผิวในบริเวณที่ $0 \leq r \leq 2d$ (เฉพาะบริเวณที่เจ็ทไหลปะทะ) และบริเวณที่ $0 \leq r \leq 4d$ (รวมบริเวณรอบๆที่เจ็ทไหลปะทะ) ที่เงื่อนไขระยะจากปากทางออกเจ็ทท่อขยายหน้าตัด

ถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน $S=2d$, $4d$ และ $6d$ ตามลำดับ ในแต่ละกราฟได้แสดงค่าตัวเลขเชลล์นัมเบอร์เฉลี่ยบนพื้นผิวกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อเพื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งปลอกท่อ จากกราฟพบว่าแนวโน้มค่าตัวเลขเชลล์นัมเบอร์เฉลี่ยของทั้งสองบริเวณมีลักษณะเหมือนกัน คือ มีค่าสูงสุดที่ความยาวปลอกท่อ $L=2d$ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวปลอกท่อเพิ่มขึ้น และพบว่ากรณีติดตั้งปลอกท่อสามารถช่วยเพิ่มค่าตัวเลขเชลล์นัมเบอร์เฉลี่ยหรือการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งปลอกท่อ โดยเฉพาะปลอกท่อที่มีความยาว $L=1D$ และ $2D$ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=2d$, $3.3d$ และ $4d$

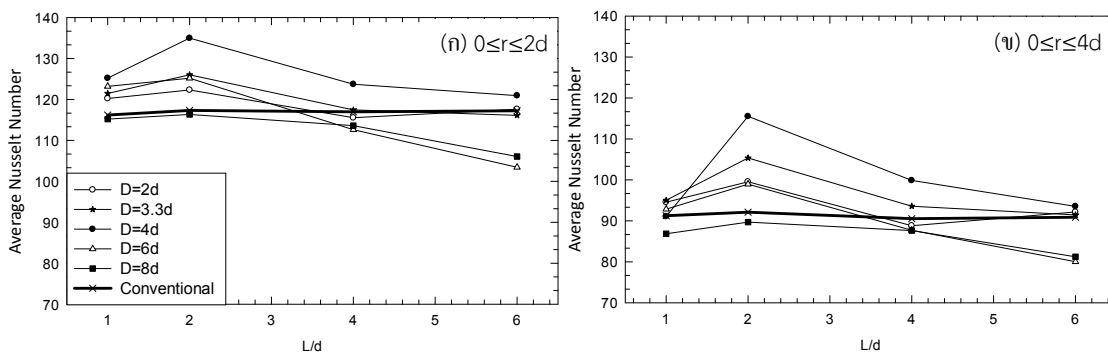




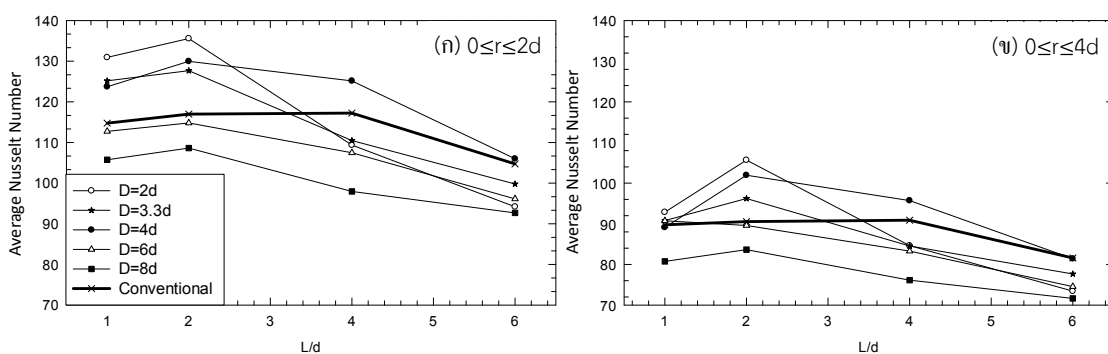
กราฟที่ 2



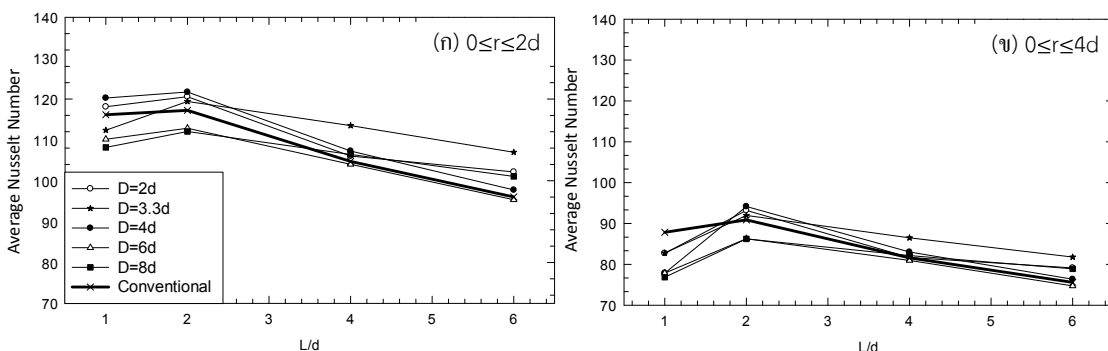
กราฟที่ 3



กราฟที่ 4



กราฟที่ 5



กราฟที่ 6

5

คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

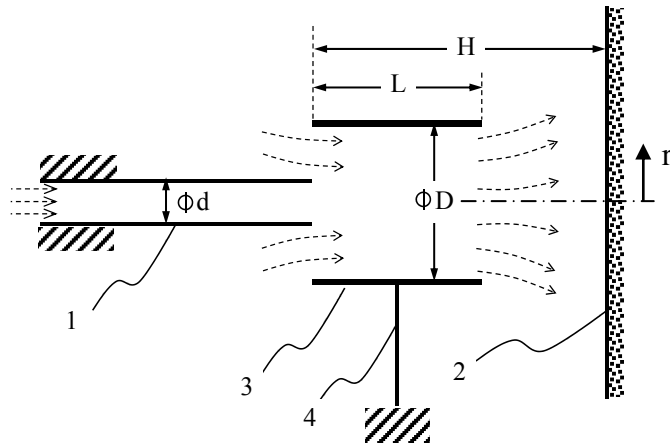
รูปที่ 1 เป็นแผนภาพระบบสำหรับให้ความร้อนหรือระบายความร้อน

รูปที่ 2 เป็นแผนภาพด้านหน้าของระบบสำหรับให้ความร้อนหรือระบายความร้อน

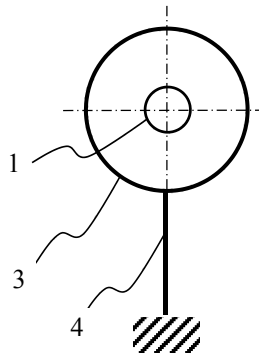
10 รูปที่ 3 เป็นแผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

เหมือนกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

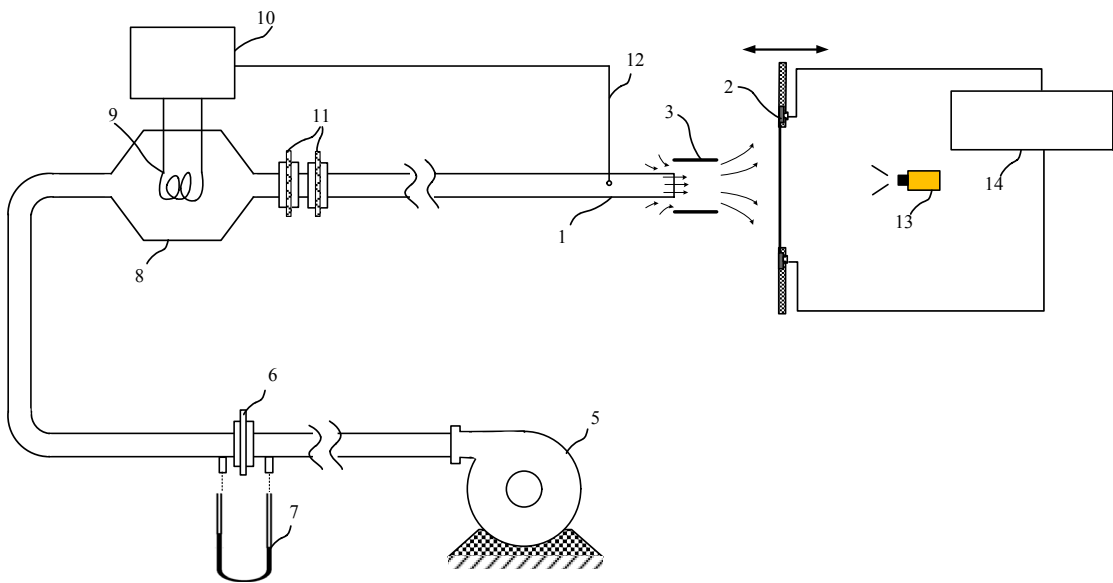


รูปที่ 1



รูปที่ 2

5



รูปที่ 3

ข้อถือสิทธิ

1. ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก ประกอบด้วย ท่อเจ็ท (1), พื้นผิวถ่ายเทความร้อน (2) และปลอกท่อ (3)
โดยมีลักษณะพิเศษ คือ
- 5 ที่ปลายท่อเจ็ท (1) มีการติดปลอกท่อ (3) ที่มีลักษณะทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอยู่ในช่วง $2d \leq D \leq 8d$ ความยาว $1d \leq L \leq 6d$ โดยมีระยะจากปากทางออกของปลอกท่อ (3) ถึงพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (2) อยู่ในช่วง $2d \leq S \leq 6d$ โดยที่ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเจ็ท (1) และกำหนดให้จุดศูนย์กลางของท่อเจ็ท (1) และปลอกท่อ (3) วางอยู่ในแนวแกนเดียวกัน
- 10 2. ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก ตามข้อถือสิทธิที่ 1 ที่ซึ่งปลอกท่อ (3) ที่มีความยาวประมาณ $L=1D-2D$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $D=2d-4d$ และระยะจากปากทางออกของปลอกท่อถึงพื้นผิวถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วง $S=2d-8d$ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง
- 15 3. ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก ตามข้อถือสิทธิที่ 1 หรือ 2 ที่ซึ่งระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอกนี้สามารถประยุกต์ใช้กับของไหลประเภทน้ำหรืออากาศ
- 20 4. ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก ตามข้อถือสิทธิที่ 1 ถึง 3 ข้อใดข้อหนึ่ง ที่ซึ่งระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอกนี้ สามารถทำงานได้ดีในช่วงความเร็วเจ็ทของไหลต่ำกว่าความเร็วเสียงในของไหล

บทสรุปการประดิษฐ์

- ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอกนี้ประกอบด้วยท่อเจ็ท ปลอกท่อและพื้นผิวถ่ายเทความร้อน โดยพื้นผิวถ่ายเทความร้อนวางอยู่ด้านหน้าปากทางออกท่อเจ็ทในลักษณะที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อเจ็ท ตำแหน่งส่วนปลาย
- 5 ของปากทางออกท่อเจ็ทมีการติดปลอกท่อรูปทรงกระบอก วางในแนวที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันระหว่างท่อเจ็ทและปลอกท่อ เมื่อของไหลไหลออกจากปากทางออกท่อเจ็ท จะดึงของไหลที่อยู่รอบๆผ่านปลอกท่อเข้ามาผสมกับการไหลของเจ็ทและไหลปะทะพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนได้สูงขึ้นโดยการติดตั้งปลอกท่อที่ปากทางออกท่อ
- 10 เจ็ท และจากการทดสอบพบว่าปลอกท่อที่มีความยาว $L=1D$ และ $2D$ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D=2d$, $3.3d$ และ $4d$ เป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับใช้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ธีรพร แก้วชูทอง		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5610120054		
วุฒิการศึกษา		ชื่อสถาบัน	ปีที่
วุฒิปริญญาตรี		มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา

ทุนการศึกษาปริญญาตรี-โท 5 ปี

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

(1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

ธีรพร แก้วชูทอง, มัถดาร์ แวะหะยี, ภาสกร เวสสะโกศล และ ชยุต นันทดุสิต 2557 ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวของเจ็ทพุ่งชนจากท่อขยายหน้าตัดที่มีการเจาะรูเหนี่ยวนำอากาศ การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10, 4-6 มิถุนายน 2557, ม.สงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

(2) บทความวิชาการ (Journal paper)

Kaewchoothong, N., Wae-hayee, M., Vessakosol, P., Niyomvas B. and Nuntadusit, C., (2014), "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Jet from Expansion Pipe Nozzle with Air Entrainment Holes", Advanced Materials Research, Vol. 932-931, pp. 1213-1217. (The 5th KKU International Engineering Conference 2014 (KKU-IENC 2014), March 27-29, Khon Kaen, Thailand)

(3) สิทธิบัตร (Patent)

ธีรพร แก้วชูทอง, มัถดาร์ แวะหะยี และ ชยุต นันทดุสิต, ระบบให้ความร้อนหรือระบายความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทของไหลจากหัวฉีดแบบท่อติดปลอก, สิทธิบัตรไทย (Thai patent), (กำลังยื่นขอ)